



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Untersuchung von vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmen in einem neuartigen längsdynamischen Fahrsimulator

Erler, Philipp
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00011838>

Lizenz:



CC-BY-NC-ND 4.0 International - Creative Commons, Namensnennung, nicht kommerziell, keine Bearbeitung

Publikationstyp: Buch

Fachbereich: 16 Fachbereich Maschinenbau

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11838>

Untersuchung von vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmen in einem neuartigen längsdynamischen Fahr Simulator

Autor: Philipp Eler

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Untersuchung von vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmen in einem neuartigen längsdynamischen Fahrsimulator

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Philipp Erler, M.Sc.

aus Saarburg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

Mitberichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Tag der Einreichung: 19. Februar 2019

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2019

Darmstadt 2018

Untersuchung von vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmen in einem neuartigen
längsdynamischen Fahrsimulator

Investigation of Predictive Motion Cueing Algorithms in a Novel Longitudinal Dynamic
Driving Simulator

Genehmigte Dissertation von Philipp Eler aus Saarburg

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

2. Gutachten: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Tag der Einreichung: 19. Februar 2019

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2019

Darmstadt – D 17

Kurzfassung

Der Einsatz dynamischer Fahrsimulatoren in der Automobilentwicklung nimmt stetig zu. Entwicklungsfeldern mit hohem Bedarf an Fahrerproben, wie der Kalibrierung von Antriebssträngen, bieten die Systeme ein enormes monetäres und zeitliches Einsparpotential aufgrund der Reduktion von Fahrerproben. Nach wie vor stellt die erforderliche, realitätsnahe Nachbildung der Beschleunigungen jedoch eine Herausforderung dar. Klassische filterbasierte Motion-Cueing-Algorithmen (MCA), die zur Steuerung der Bewegungsplattformen von Simulatoren dienen, haben sich diesbezüglich als unzureichend erwiesen, weshalb modellprädiktive Ansätze zunehmend in den Fokus der Forschung rücken. Diese Ansätze versprechen in Bezug auf die Rückmeldung der Fahrzeugbeschleunigungen eine deutliche Steigerung des Realitätsgrads, jedoch mit der Einschränkung, dass Fahrer einer Beschleunigungsreferenz folgen müssen.

Die vorliegende Arbeit untersucht anhand von vordefinierten Fahrszenarien die grundsätzliche Eignung vorausschauender Motion-Cueing-Ansätze zur Beurteilung des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens. Zu diesem Zweck wird ein neuer Fahrsimulator entwickelt, dessen Bewegungssystem sich auf die Darstellung der Längsdynamik beschränkt. Gegenüber gängigen Stewart-Plattformen zeichnet sich das System durch eine, in der Komplexität deutlich reduzierte, Kinematik aus, die Neigungsbewegungen von etwa $\pm 25^\circ$ mit Drehzentren oberhalb des Fahrers erlaubt. In Kombination mit einem horizontalen Bewegungsraum von ± 5 m ermöglicht das System Beschleunigungen von bis zu $8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Die Arbeit stellt die Ergebnisse aus drei Untersuchungen vor. Eine erste Studie zum Einfluss unterschiedlicher Drehzentrumpositionen auf die Simulationsgüte lässt folgende Erkenntnisse zu: Die Differenzierbarkeit verschiedener Positionen ist gering und mit einem höher liegenden Drehzentrum ergibt sich lediglich die Tendenz einer höheren Realitätseinschätzung. Der Vergleich der Ergebnisse einer weiteren Versuchsreihe zeigt, dass sich, bei Verwendung eines vorausschauenden MCA, die Differenzierbarkeit der Beschleunigungsstärke gegenüber einer horizontal dargestellten Beschleunigung nicht ändert. Dieses Resultat spricht für eine unveränderte Beschleunigungswahrnehmung durch vorausschauende MCA und ebnet den Weg für eine abschließende Validierung, d. h. der Überprüfung der Übertragbarkeit der Testergebnisse auf eine reale Fahrsituation. Eine entsprechende dritte Studie zeigt anhand eines Vergleichs mit Fahrten im kontrollierten Feld die Stärken und Schwächen des vorausschauenden MCA auf.



Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 07.08.2019

(Philipp Erler)



Inhaltsverzeichnis

Notation	IX
<hr/>	
1 Einleitung	1
1.1 Fragestellungen und Zielsetzung	3
1.2 Struktur der Arbeit	5
<hr/>	
2 Grundlagen und Stand der Forschung	7
2.1 Multisensorische Verarbeitung in der Fahrsimulation	7
2.1.1 Wahrnehmung von Bewegungen	9
2.1.2 Wahrnehmungsschwellen	19
2.2 Tilt-Coordination	21
2.3 Einfluss der Drehzentrumslage und der Tilt-Coordination auf die Beschleunigungswahrnehmung	25
2.4 Motion-Cueing-Algorithmen	26
2.4.1 Classical-Washout-Algorithmus	27
2.4.2 Ansätze basierend auf modellprädiktiver Regelung	30
2.5 Simulatorkrankheit	35
2.6 Lastwechselphänomene	36
2.7 Technik der Fahrsimulation	38
2.7.1 Subsysteme und Klassifizierung von Simulatoren	38
2.7.2 Umsetzungen von Bewegungssystemen	39
<hr/>	
3 Entwicklung eines längsdynamischen Fahrsimulators	43
3.1 Entwicklungsziel	43
3.2 Entwicklungsmethodik	44
3.3 Anforderungen	45
3.4 Beschreibung des Fahrsimulators	48
3.4.1 Konzept des Bewegungssystems	49

3.4.2	Auslegung des Bewegungssystems	50
3.4.3	Technische Details des Bewegungssystems	54
3.4.4	Fahrgastzelle und Bedienelemente	56
3.4.5	Sichtsystem	59
3.4.6	Geräusch- und Vibrationssystem	61
3.4.7	Soft- und Hardwarekomponenten zur Ansteuerung	61
3.4.8	Softwareseitige Sicherheit	64
3.5	Berechnung von Trajektorien	65
3.5.1	Nachbildung des Lastwechselmanövers	66
3.5.2	Umsetzung eines optimierungsbasierten, vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmus	68
3.6	Analyse des Simulators	76
3.6.1	Darstellungsgrenzen	76
3.6.2	Messung der Sichtsystem- und Bewegungssystemlatenz	78
3.6.3	Übertragungsverhalten des Bewegungssystems	81

4 Probandenstudien **89**

4.1	Einfluss der Drehpunktlage auf die Simulationsgüte	89
4.1.1	Fragestellung und Zielsetzung	90
4.1.2	Studienaufbau und Durchführung	90
4.1.3	Ergebnisse und Diskussion	94
4.2	Einfluss der Tilt-Coordination auf die Differenzierbarkeit der Beschleunigung	96
4.2.1	Fragestellung und Zielsetzung	96
4.2.2	Studienaufbau und Durchführung	97
4.2.3	Ergebnisse und Diskussion	101
4.3	Erleben und Beurteilen der Längsdynamik im Fahr Simulator	102
4.3.1	Fragestellung und Zielsetzung	103
4.3.2	Studienaufbau und Durchführung	103
4.3.3	Ergebnisse und Diskussion	114
4.3.4	Fazit	128

5 Zusammenfassung und Ausblick **131**

5.1	Zusammenfassung	131
5.2	Ausblick	133

A Herleitung der Dynamik	135
A.1 Abstand des Schwerpunktes zum Punkt C	136
A.2 Kräfte aufgrund der Gravitation	136
A.3 Anteil durch Translation der Plattform	137
A.4 Kräfte aufgrund von Hubbewegungen der Plattform	137
A.5 Summation der Kraftanteile	138
B Fragebögen	139
C Betreute studentische Arbeiten	141
Abbildungsverzeichnis	145
Tabellenverzeichnis	147
Literatur	149



Notation

In dieser Arbeit gelten folgende Konventionen:

- Matrizen, Vektoren bzw. in Vektorform zusammengefasste Größen werden fett gedruckt.
- Unterstrichene Vektoren und Matrizen enthalten Werte für mehrere Zeitschritte
- Bezugssysteme werden mit einer Hochstellung angegeben, bspw. durch $^{(I)}$ für Größen im inertialen Bezugssystem
- Die Größe $\theta^{(I)}$ beschreibt den Neigungswinkel der Simulatorplattform um eine horizontale Querachse. Da sich die Größe immer auf das Inertialsystem bezieht, wird aus Gründen der Übersicht bei dieser auf die Angabe des Bezugssystems verzichtet.

Vektoren und Matrizen

Symbol	Beschreibung
$\mathbf{a} = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}]^T$	Längs-, Quer-, und Vertikalbeschleunigung
\mathbf{A}	Systemmatrix
\mathbf{B}	Eingangsmatrix
\mathbf{C}	Ausgangsmatrix
\mathbf{D}	Durchgangsmatrix
$\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T$	Spezifische Kräfte in Längs-, Quer-, und Vertikalrichtung
\mathbf{F}	Systemmatrix Bewegungssystem
\mathbf{g}	Gravitationskraftvektor
\mathbf{G}	Gewichtungsmatrix
\mathbf{H}	Gewichtungsmatrix
\mathbf{L}	Rotationsmatrix der Linearbeschleunigungen
\mathbf{S}	Eingangsmatrix Bewegungssystem
\mathbf{T}	Rotationsmatrix der Winkelgeschwindigkeiten
\mathbf{u}	Eingangsvektor



Symbol	Beschreibung
\mathbf{x}	Zustandsvektor
\mathbf{y}	Ausgangsvektor
$\boldsymbol{\beta} = [\varphi, \theta, \psi]^T$	Plattfordrehwinkelvektor
$\boldsymbol{\omega} = [\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$	Roll-, Nick-, Wankrate

Formelzeichen

Symbol	Beschreibung
a	Amplitude der Sinussumme
b	Frequenz der Sinussumme
c	Nullphasenwinkel der Sinussumme
C	Kohärenz
d	Konstantanteil der Ruckelschwingung
f	Spezifische Kraft
g	Gravitationskraft
G	Leistungsdichte
h	Amplitude der Ruckelschwingung
H	Schätzung
k	Laufvariable
J	Kostenfunktion
l	Länge
m	Frequenz der Ruckelschwingung
n	Lauf/Zählvariable
N	Horizont
o	Nullphasenwinkel der Ruckelschwingung
q	Faktor zur Manipulation der Ruckelschwingung
p	Exponent der Ruckelschwingung
R	Bezugssystem (engl. reference system)
t	Zeit
T	Periodendauer
x	Längsposition
\dot{x}	Längsgeschwindigkeit
\ddot{x}	Längsbeschleunigung
$\ddot{\ddot{x}}$	Längsruck
X	Fourier-Tranformierte des Eingangs
y	Querposition



Symbol	Beschreibung
\dot{y}	Quergeschwindigkeit
\ddot{y}	Querbeschleunigung
Y	Fourier-Tranformierte des Ausgangs
z	Vertikalposition
\dot{z}	Vertikalgeschwindigkeit
\ddot{z}	Vertikalbeschleunigung
α	Orientierung spezifische Kraft; Signifikanzniveau
β	Winkel Schwerpunktlage auf Simulatorplattform
θ	Neigungswinkel/Nickwinkel
$\dot{\theta}$	Neigungsrate
$\ddot{\theta}$	Neigungsbeschleunigung
$\ddot{\theta}$	Neigungsruck
Ω	Frequenz der äußeren Erregung
ρ	Korrelationsfaktor

Indizes

Index	Beschreibung
A	Amplitude (engl. Amplitude)
C	Korrektur (engl. Correction)
f	Spezifische Kraft (engl. specific force)
F	Frequenz (engl. Frequency)
i	Zählvariable
(I)	Inertiales Bezugssystem (engl. Inertial)
IP	Transformation vom plattformfesten ins inertielle Bezugssystem
k	Aktueller Zeitschritt
MC	Bewegungsreiz (engl. Motion Cue)
s	Zeitschritt (engl. Sample)
S	Simulator (engl. Simulator)
P	Prädiktion (engl. Prediction)
POR	Drehpunkt (engl. Point of Rotation)
(P)	Plattformfestes Bezugssystem (engl. Platform)
PPh	Zugphase (engl. Pull Phase)
r	Rotation (engl. Rotation)
ref	Referenz (engl. Reference)
TC	Neigungscoordination (engl. Tilt Coordination)



Index	Beschreibung
<i>TH</i>	Schwelle (engl. Threshold)
<i>TPh</i>	Schubphase (engl. Thrust Phase)
<i>V</i>	Fahrzeug (engl. Vehicle)
<i>(V)</i>	Fahrzeugfestes Bezugssystem (engl. Vehicle)
<i>WO</i>	Washout
<i>x</i>	Längsrichtung
<i>xx</i>	Autoleistungsdichte des Eingangssignals
<i>xy</i>	Kreuzleistungsdichte
<i>y</i>	Querrichtung
<i>yy</i>	Autoleistungsdichte des Ausgangssignals
<i>z</i>	Vertikalrichtung
Σ	Summe

Abkürzungen

Akronym	Beschreibung
AGARD	Advisory Group for Aerospace Research and Development
APP	Fahrpedalposition (engl. Accelerator Pedal Position)
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FZD	Fachgebiet Fahrzeugtechnik Darmstadt
H	Hypothese
HMD	Head-Mounted-Display
IMS	Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau
ITWM	Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
MCA	Motion-Cueing-Algorithmus
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MPC	Modellprädiktive Regelung (engl. Model-Predictive-Control)
MPI	Perceived-Motion-Incongruence
NVH	Noise-Vibration-Harshness
PANAS	Positive and Negative Affect Schedule
SIL	Safety Integrity Level
SSQ	Simulator-Sickness-Questionnaire
TC	Tilt Coordination
TH	Schwelle (engl. Threshold)
TU	Technische Universität



Akronym	Beschreibung
UV	Unabhängige Variable
VR	Virtuelle Realität

1 Einleitung

Eine der größten Herausforderungen in der Entwicklung von Fahrzeugantriebssträngen ist die Beibehaltung von fahrbarkeitsrelevanten Fahrzeugeigenschaften unter Berücksichtigung der vom Gesetzgeber geforderten Emissionswerte. Hinzu kommen weitere, divergierende Ziele wie kürzere Entwicklungszyklen bei zunehmend elektrifizierter Variantenvielfalt und die Reduktion von Entwicklungskosten. Um diesen Zielkonflikt gerecht zu werden, besteht das Bestreben neue Werkzeuge zur Verbesserung der Entwicklungsprozesse zu identifizieren und zu etablieren, bspw. virtuelle Methoden als Ersatz für kostenintensive und zeitaufwendige Fahrerprobungen. Entsprechende Softwarelösungen ermöglichen zwar in einem frühen Entwicklungsstadium eine Beurteilung des subjektiven Fahrempfindens anhand von objektiven Kriterien, sind jedoch nicht ausreichend, um eine finale Beurteilung über die Gesamtfahreigenschaften eines Fahrzeugs abzugeben. Auf lange Sicht wird darüber stets ein Subjektivurteil entscheiden. [18, S. 804].

Wenngleich darunter Fahrerprobung mit einem realen Versuchsfahrzeug zu verstehen sind, kann eine solche subjektive Bewertung auch in einem Fahr Simulator erfolgen, der das dynamische Fahrzeugverhalten nachbildet. Als reproduzierbare Testumgebung bieten Fahr Simulatoren die Möglichkeit in frühen Entwicklungsphasen das Fahrzeugverhalten oder einzelne Fahrzeugkomponenten gefahrenfrei zu untersuchen. Weitere Vorteile liegen vor allem in der schnellen Änderungsmöglichkeit von Fahrzeug- und Umfeldparametern [157, S. 57]. Aus diesen Gesichtspunkten bietet sich, gerade in der erprobungslastigen Antriebsstrangentwicklung, die Verlagerung von Untersuchungen in einen Fahr Simulator an. Dennoch hat dieser Prozess bis zum heutigen Zeitpunkt lediglich im geringen Maße stattgefunden. Unter einer Vielzahl von Ursachen ist die wahrscheinlich entscheidende Einschränkung die begrenzte Darstellbarkeit der Fahrzeugbeschleunigungen wodurch eine uneingeschränkte Validität der Testergebnisse, d. h. deren Übertragbarkeit auf eine reale Fahrsituation, nicht gegeben ist. Dies begründet sich mit dem begrenzten Bewegungsraum dynamischer Simulatoren. Während Fahrzeugen im Feld kilometerlange Strecken zur Verfügung stehen, agieren Simulatoren mit Bewegungssystemen für gewöhnlich innerhalb weniger Meter. Der offensichtlichen Lösung, den Bewegungsraum zu erweitern, steht eine deutliche Erhöhung

des finanziellen und technischen Aufwands gegenüber. Aus diesem Grund müssen Beschleunigungen in der Regel skaliert, d. h. abgeschwächt im Simulator dargestellt werden.

Aufgrund der Skalierung sind empirische Evaluationen zur Wahrnehmung des Fahrzeugverhaltens meist komparativer Natur. Darunter zu verstehen sind vergleichende Untersuchungen von zwei oder mehreren Einheiten, bspw. Antriebsstrangkonfigurationen, woraus eine Bewertung der Einheiten relativ zueinander resultiert („*Konfiguration 1 gefällt besser als Konfiguration 2*“). Dies kann als Entscheidungsgrundlage für die Wahl einer Einheit herangezogen werden, jedoch muss eine absolute Bewertung nach wie vor im Fahrzeug erfolgen. Demzufolge ist der Verzicht auf die Skalierung ein essentieller Schritt, um das Spektrum durchführbarer Untersuchungen im Simulator um solche zu erweitern, deren Ergebnis eine absolute Aussage über das längsdynamische Verhalten beinhalten.

Einen Ansatzpunkt zur Erweiterung der Bandbreite darstellbarer Beschleunigungen im Simulator bietet eine bessere Ausnutzung des Bewegungsraums. Die Ausnutzung bestimmt sich maßgeblich durch den sogenannten Motion-Cueing-Algorithmus (MCA) [123, S. 36]. Dieser bildet die darzustellenden Fahrzeugbeschleunigungen in Bewegungen ab, die der Simulator dynamisch umsetzt. Am weitesten Verbreitung finden klassische, filterbasierte Motion-Cueing-Ansätze, welche sich durch geringe Komplexität und eine bereits langjährige Verwendung auszeichnen. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, die Grenzen des Bewegungsraums im Entwurf direkt vorzugeben, sind diese häufig entscheidend für die Wahl der Parameter und erfordern die zuvor diskutierte Skalierung. Eine zunehmend an Relevanz gewinnende Alternative stellen modellprädiktive Ansätze dar. Diese bieten, durch ein vorausschauendes Verhalten im Bezug auf zukünftige Fahrsituationen, das Potential einer deutlich verbesserten Bewegungsraumausnutzung. Nachteilig ist jedoch, dass die Verwendung die Kenntnis der zukünftigen Fahrsituationen erfordert. Dementsprechend sind modellprädiktive Ansätze für das freie, d. h. durch den Fahrer selbstbestimmte, Fahren nur eingeschränkt geeignet.

Trotzdem ist die Verwendung dieser Algorithmen für vorab definierte Fahrszenarien, d. h. solche, die der Fahrer lediglich erlebt jedoch nicht beeinflussen kann, möglich. Die Durchführung entsprechender Untersuchungen ermöglicht ein Höchstmaß an Reproduzierbarkeit der zu bewertenden Szenarien und ist ausreichend, um die grundsätzliche Eignung modellprädiktiver MCA für das Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens in einem Simulator zu untersuchen.

1.1 Fragestellungen und Zielsetzung

Die konkrete Fragestellung mit der sich diese Arbeit befasst lautet:

1. *Ist ein vorausschauender Motion-Cueing-Ansatz zum Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens geeignet?*

Das Erleben bzw. die Erlebbarkeit beschreibt, entsprechend einer Definition von Wiedemann [155, S. 4], die Eigenschaft, einen Sachverhalt anschaulich, d. h. mit den menschlichen Sinnessystemen wahrnehmbar, darzustellen. Unter dem Fahrzeugverhalten wird die „*Reaktion des Fahrzeugs auf Fahrereingaben und auf Störungen*“ verstanden [107, S. 125]. Die Fragestellung beschränkt sich bewusst auf die, für die Antriebsstrangentwicklung relevanten, längsdynamischen Reaktionen, d. h. die auftretenden Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Wege in die Längshauptbewegungsrichtung, eines Fahrzeugs.

Die Klärung dieser Frage erfordert die Durchführung von Probandenstudien in einem Fahrsimulator. Um die grundsätzliche Eignung des vorausschauenden MCA zu untersuchen bzw. das Erlebte einer simulierten Fahrt zum Ausdruck zu bringen, wird es als nicht erforderlich erachtet, dass die Probanden selbstständig fahren. Deshalb kommen für die Studien lediglich vorab definierte Fahrscenarien zum Einsatz. Für die Durchführung strebt die vorliegende Arbeit die Entwicklung eines Fahrsimulators mit einem ausschließlich für die Darstellung der Längsdynamik geeigneten Bewegungssystem an. Die Tauglichkeit dieser Testumgebung gilt es zu überprüfen, sodass die zweite, zu klärende Fragestellung lautet:

2. *Ist der längsdynamische Fahrzeugsimulator zum Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens geeignet?*

Die Eignung des Fahrsimulators drückt sich zum einen durch eine ausreichend hohe objektive Realitätsnähe, d. h. der exakten Nachbildung der realen Sinnesreize, aus und zum anderen, in Kombination mit dem MCA, durch die Subjektivbeurteilung während der Probandenstudien. Zur Überprüfung der Realitätsnähe erfolgt daher eine Analyse des Systems.

Mit der Klärung der Fragestellung leistet die Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung der Simulatortechnik und eine Darlegung des Potentials durch den erweiterten Einsatz dynamischer Simulatoren im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen. Der Beitrag zur Simulatortechnik besteht darin, dass Erkenntnisse über (Modell-)

prädiktive Motion-Cueing-Ansätze, welche hinsichtlich ihrer Wahrnehmung bisher weitestgehend unerforscht sind, gesammelt werden. Weiterhin wird indirekt eine verbesserte Darstellung der Längsdynamik in Simulatoren erzielt. Der neu entwickelte Fahr Simulator, als validierte Testumgebung, stellt ein Mehrge winn dar, da er für die Erforschung einer Vielzahl von Wahrnehmungsphänomenen genutzt werden kann, aus welchen sich wiederum Kriterien zur zielgerichteten Auslegung der Fahrzeugcharakteristik ableiten lassen. Im Entwicklungsprozess kann eine positive Beantwortung der Fragestellungen dazu beitragen, die Etablierung dynamischer Simulatoren voranzutreiben und den Bedarf kostenintensiver Erprobungsfahrten zu reduzieren.

1.2 Struktur der Arbeit

Die Basis dieser Arbeit bilden entsprechend Bild 1.1 die in Kapitel 2 behandelten Grundlagen der menschlichen Bewegungswahrnehmung und der Stand der Technik im Bereich der Fahrsimulation, was den aktuellen Forschungsstand zu vorausschauenden MCA mit einschließt. Anhand dieser Grundlagen und weiteren technischen Randbedingungen erfolgt in Kapitel 3 die Definition von Anforderungen zur Entwicklung des längsdynamischen Fahrsimulators. Der Beschreibung der wichtigsten Hard- und Softwarekomponenten des Systems folgt eine Analyse zum Ende des 3. Kapitels. Kapitel 4 diskutiert die Durchführung und Ergebnisse von drei Probandenstudien zur Klärung der Forschungsfragen. Abschließend werden die Kernerkenntnisse dieser Arbeit in Kapitel 5 zusammengefasst und ein Ausblick für zukünftige Arbeiten gegeben.

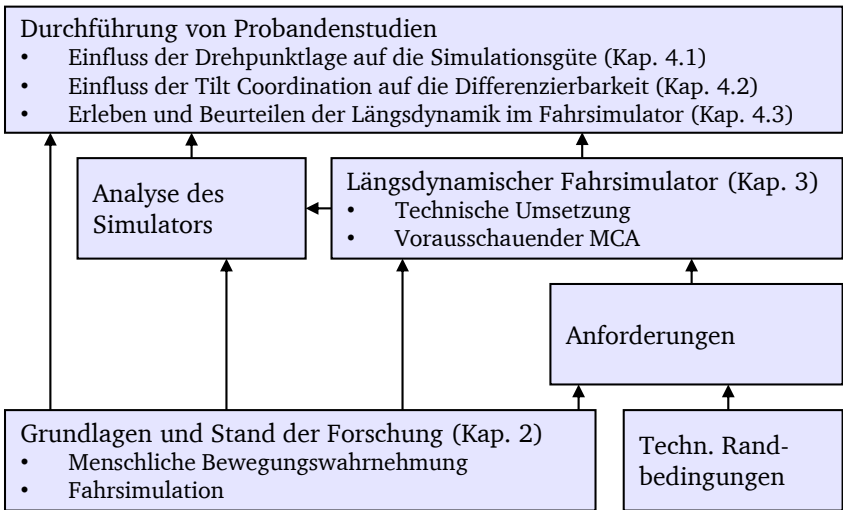


Bild 1.1: Struktur der Arbeit



2 Grundlagen und Stand der Forschung

Die Entwicklung von Simulatoren reicht zurück bis ins frühe 20. Jahrhundert. Den ersten dokumentierten Flugsimulator entwickelte die Firma Antoinette Aircraft zur Ausbildung von Piloten im Umgang mit der nicht intuitiven Bedienung der Flugzeuge [131]. Im Jahre 1954 erfuhr die Flugsimulation eine Revolution durch die von Gough erfundene Bewegungsplattform, die 1965 erstmals in einem Flugsimulator Einsatz fand und heute unter den Bezeichnungen Stewart/Gough-Plattform oder Hexapod geläufig ist [137]. Im darauffolgenden Jahrzehnt entstanden die ersten Fahrsimulatoren [34, S. 32, 118, S. 10]. Seitdem schließt sich die Lücke zwischen realer und simulierter Fahrt stetig, wodurch der Fahrsimulation eine zunehmend tragende Rolle in der Automobilentwicklung zukommt. Dieses Kapitel diskutiert die grundlegenden Erkenntnisse im Bereich Fahrsimulation mit Fokus auf der Darstellung und Wahrnehmung von Bewegungen.

2.1 Multisensorische Verarbeitung in der Fahrsimulation

Bild 2.1 zeigt ein Schema, das die Schritte des menschlichen Wahrnehmungsprozesses skizziert. Die gesamte Prozesskette unterteilt sich in die übergeordnete Sinnesphysiologie und Wahrnehmungspsychologie und diese wiederum in untergeordnete Grundphänomene. Die unterste Ebene des Bildes stellt die Abbildungsbedingungen dar. Diese ermöglichen die Abbildung eines Grundphänomens auf ein weiteres. Ausgangspunkt der Sinnesphysiologie ist ein Phänomen der Umwelt, das mit den menschlichen Sensoren in Interaktion tritt. Die Interaktion findet in Form von Reizen, auch Stimuli genannt, statt, die eine physikalische oder chemische Größe darstellen. Führt ein Reiz zu einer überschwelligem Potentialänderung, dem Aktionspotential eines Sensors, erzeugt dies wiederum eine Erregung von Nerven. Über die Nervenbahnen gelangen diese Erregungen, in der Regel in Form von elektrischen Strömen, zum Zentralnervensystem. An dieser Stelle erfordert der Übergang von der Sinnesphysiologie zur Wahrnehmungspsychologie das

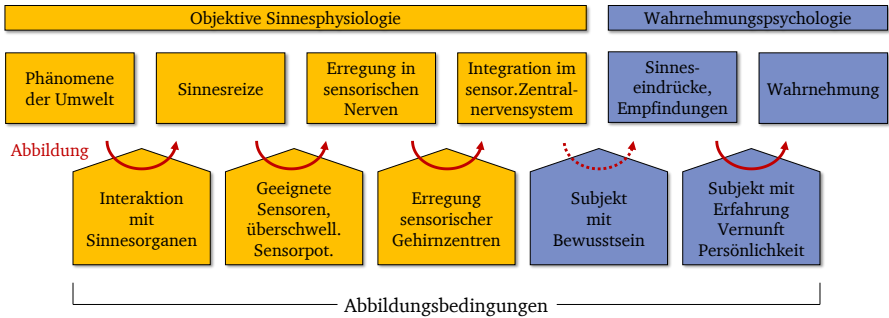


Bild 2.1: Schema zur Sinnesphysiologie mit Übergang von physiologischen zu psychologischen Prozessen [125, S. 275]

Vorhandensein eines Bewusstseins, das zu Sinneseindrücken und Empfindungen führt. Auf Grundlage von Erfahrungen und Vernunft formt sich daraus letztlich die Wahrnehmung. Während es sich bei den Vorgängen der Physiologie größtenteils um objektivierbare Sachverhalte handelt, bspw. die Messung eines Aktionspotentials, ist die anschließende Verarbeitung der Sinneseindrücke ein rein subjektiver Prozess. Dies führt dazu, dass Menschen ihre Umwelt trotz annähernd gleicher „Sensorik“ unterschiedlich wahrnehmen. Für gewöhnlich wirken die von einem Objekt oder Ereignis ausgehenden Reize nicht nur auf einen Sinneskanal ein, sondern simultan auf mehrere. Um ein widerspruchsfreies Bild zu erzeugen, nutzt das Hirn interne Modelle, die durch Erfahrungen bzw. Vorwissen im Laufe des Lebens entstehen oder aus früheren Generationen in unseren Genen gespeichert sind [42].

Aktueller Gegenstand der Forschung ist die Klärung der Frage nach der Gewichtung der Reize, d. h., welcher Reiz in bestimmten Situationen die Wahrnehmung dominiert. Bspw. kann das hör- und fühlbare Knacken von Chips den Geschmack verändern (Crisp-Sound-Effekt) [133] oder bei einem Bauchredner die gesehene Lippenbewegungen einer Puppe die gehörte Position einer Schallquelle dominieren (Bauchredner-Effekt) [159]. Um solche Phänomene zu erklären, ist es nicht ausreichend einzelnen Sinneseindrücken isoliert zu erforschen. Zur Beschreibung kann das Modell der multisensorischen Verarbeitung herangezogen werden, worunter eine Verarbeitung nicht redundanter und redundanter Reize durch Kombination und Integration zu verstehen ist [41]. In diesem Zusammenhang sind redundante Reize solche, die dieselben Einheiten und dasselbe Koordinatensystem

me besitzen. Ein Beispiel ist die Größe eines Objektes, die durch die Hand gefühlt und durch das Auge gesehen werden kann. Stellt sich nun die Frage, welche Sinnesinformation die Abschätzung der Größe dominiert, muss zunächst berücksichtigt werden, dass diese, vergleichbar mit technischen Sensoren, mit Rauschen behaftet sind. Aufgrund dieses Rauschens entsteht in den Sinneseindrücken eine Varianz, die als Maß für die Verlässlichkeit eines Signals herangezogen wird. Ist die Verlässlichkeit bzw. die Qualität eines Signals gering, wird es mit einer geringen Gewichtung verarbeitet. Ist sie hoch, dominiert die entsprechende Sinnesmodalität den Gesamteindruck. Die Verlässlichkeit unseres Gesamteindrucks ergibt sich letztlich aus der Summe der Verlässlichkeit der einzelnen Informationsquellen und nimmt somit durch die Integration weiterer Informationsquellen zu. So zeigt bspw. Meyer, dass räumlich und zeitlich übereinstimmende Reize zu einer Erhöhung der Detektierbarkeit eines schwelennahen Reizes führen [95]. Im umgekehrten Fall nimmt die multisensorische Verstärkung ab, wenn die Reize asynchron wirken [135].

Für die Fahrsimulation lassen sich aus der Betrachtung des grundlegenden Wahrnehmungsprozesses und der multisensorischen Verarbeitung einige Erkenntnisse ableiten. Die Wahrnehmung wird geprägt durch die Vernunft, die Erfahrung und die Persönlichkeit jedes Individuums. Dadurch entstehen, unabhängig von der objektiven Güte der Reiznachbildung, unterschiedliche Beurteilungen einer Simulation. Aufgrund der multisensorischen Verarbeitung sollten die physikalischen Reize nachgebildet werden, die wichtig für das Erleben und Beurteilen der Fahrzeuglängsdynamik sind. Dies jedoch unter der Voraussetzung, dass die Reize untereinander kongruent sind. Ist diese Anforderung nicht erfüllt, sollte auf die Darstellung des Reizes gänzlich verzichtet werden.

Für die Entwicklung und den Betrieb eines dynamischen Fahrsimulators ist ein Verständnis über die Wahrnehmung von Bewegungen, im Speziellen der Beschleunigungen, und die Möglichkeiten diese im Simulator abzubilden notwendig. Die folgenden Unterabschnitte adressieren diese Sachverhalte.

2.1.1 Wahrnehmung von Bewegungen

Unter (Eigen-)Bewegung (engl. self-motion oder egomotion) ist die Verschiebung eines Wahrnehmenden im Raum zu verstehen [154, S. 7] die rotative und translatorische Anteile beinhalten kann. Abzugrenzen ist die Wahrnehmung von (Eigen-)Bewegung vom Forschungsfeld der Fortbewegung (engl. locomotion), welches

sich dem Vorgang der Bewegung widmet. Zur Bestimmung der Position und Bewegung im Raum, nutzt der Mensch vier Sinnesmodalitäten:

- Das **Vestibuläre System** beschreibt die Wahrnehmung über das Gleichgewichtsorgan und stellt die „Beschleunigungssensorik“ des Menschen dar.
- Das **Visuelle System** beschreibt die Wahrnehmung der Augen.
- Das **Auditive System** beschreibt die Wahrnehmung des Gehörs.
- Das **Somatosensorische System** beschreibt die Wahrnehmung über die Haut, Muskeln, Gelenke und Sehnen.

Im Fokus steht die Klärung der Fragen, welche Sinnesmodalitäten den Eindruck von Beschleunigung und Geschwindigkeit vermitteln. Als am wichtigsten wird im Rahmen der Fahrsimulation das vestibuläre System erachtet. Dieses erlaubt es dem Menschen, Translations- und Rotationsbewegungen wahrzunehmen und liefert die für den aufrechten Gang essentielle Gleichgewichtsfunktion. Die in den folgenden Unterabschnitten gezeigten Informationen zur Funktionsweise der Sinnessysteme entstammen den Standardwerken zur Wahrnehmungspsychologie von Goldstein [54], von Schmidt und Lang [125] und Purves [113]. Eine auf die Fahrsimulation zugeschnittene Zusammenfassung zur Funktionsweise der Sinnesmodalitäten liefert die Arbeit von Negele [102, S. 9ff].

Vestibuläres System

Das im Sprachgebrauch meist als Gleichgewichtsorgan bezeichnete vestibuläre System (vgl. Bild 2.2) besteht aus zwei Vestibularorganen, die sich jeweils im rechten und linken Innenohr befinden. Jedes Organ besteht aus zwei Maculaorganen zur Detektion von translatorischen Beschleunigungen und drei Bogengängen (auch als semizirkuläres System bezeichnet) zur Detektion von Rotationsbewegungen. Mit der Cochlea, der Hörschnecke, bilden diese eine integrierte Einheit.

Die Sensierung von Drehbewegungen erfolgt anhand der drei Bogengänge. Diese sind mit einer gallertartigen Flüssigkeit, der sogenannten Endolymphe, durchzogen, die sich relativ zum umliegenden Gewebe bewegen kann. In den Gängen befinden sich jeweils an einer Stelle Sinneshärchen, die mit einer kissenartigen

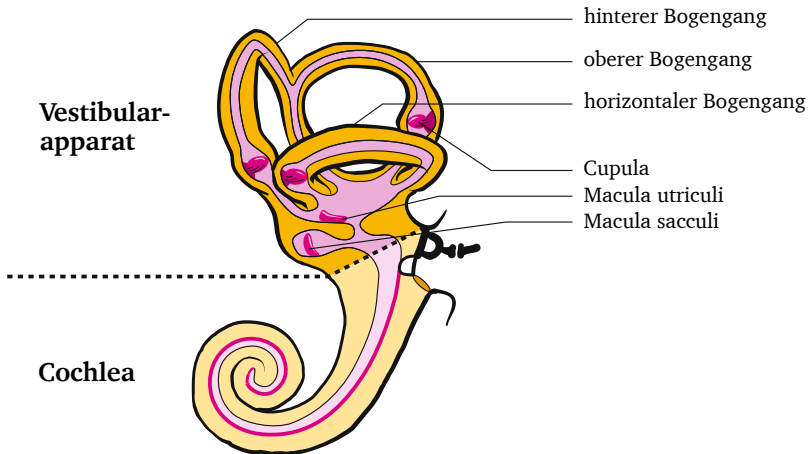


Bild 2.2: Schema der Bogengangsorgane und der Maculaorgane, entnommen aus [126, S. 313]

Masse, der Cupula, umfasst sind. Im Falle einer Drehbewegung bleibt die Endolymphe aufgrund ihrer Trägheit gegenüber dem umliegenden Gewebe zurück, wodurch es zu einer Verformung der Cupula kommt. Dies führt zu einer Erregung der Nerven bzw. im Zentralnervensystem zur einer Informationen über die rotative Bewegung. Durch die senkrechte Anordnung der drei Bogengänge zueinander ist der Mensch in der Lage, Rotationen in alle Raumrichtungen wahrzunehmen.

Die Rezeptoren der Maculaorgane, Sacculus und Utriculus, messen Linearbeschleunigungen ähnlich wie Inertial-Massen-Sensoren. Sie sind senkrecht zueinander angeordnet, sodass der Sacculus auf vertikale und der Utriculus auf horizontale Beschleunigungen reagiert. Gegenüber der für die Rotationsbewegung zuständigen Cupula befinden sich auf der Macula zusätzlich kleine Kalziumkarbonatkristalle, welche dieser eine 2,7-mal höhere spezifische Dichte als der umgebenden Endolymphe verleihen [54, S. 506]. Infolge einer linearen Beschleunigung kommt es folglich zu einer Verformung der Macula, welche Informationen über den Beschleunigungszustand liefert.

Liegt für längere Zeit ein konstanter Reiz an einem menschlichen Sensor an, fällt das Rezeptorpotential meist auf ein Ruhepotential ab. Dieser Vorgang wird Adaption genannt und ist im Falle des vestibulären Systems der Grund, weshalb die Gravitation nicht permanent wahrgenommen wird [126, S. 186]. Ähnlich ver-

hält es sich mit Bewegungen, die sehr geringe Beschleunigungen verursachen. Niedrige Reizintensitäten, die das Ruhepotential kaum verändern, können aufgrund des sensorischen Rauschens nicht aufgelöst werden. Sie liegen unterhalb einer sogenannten Wahrnehmungsschwelle. Dies wird sich in der Fahrsimulation zu Nutze gemacht. So kann durch langsame Neigung ein auf das Maculaorgan wirkender Anteil der Gravitation die Illusion einer horizontalen Beschleunigung erzeugen, da der rein vestibulär wahrgenommene Bewegungszustand nicht eindeutig ist. Eine Verstärkung dieses Effekt kann durch die Integration weiterer Sinnesmodalitäten, insbesondere dem visuellen System, erzielt werden [90].

Visuelles System

Es ist möglich, nur durch visuelle Reize die Illusion von longitudinaler Eigenbewegung zu vermitteln. Dieser Effekt wird Vektion genannt und entsteht, wenn ein Wahrnehmender eine bewegte Szene sieht und den Eindruck gewinnt, er selbst würde sich bewegen [35, S. 46, 65, S. 759]. Vielen Menschen ist dieser Effekt bekannt, wenn sie aus einem stehenden Zug heraus einen anfahrenden Zug beobachten. Die Ursache liegt primär im sogenannten optischen Fluss. Bewegt sich ein Wahrnehmender, beschreiben die Bildpunkte im peripheren Sichtfeld einen Vektor in einer Sequenz von Bildern. Die Länge und Orientierung der Vektoren ist ein Maß für die Geschwindigkeit und die Richtung. In der Szene des anfahrenden Zuges nehmen Menschen folglich visuell einen beim Bewegen gewohnten Reiz wahr. Dieser steht jedoch im Konflikt mit dem nicht wahrgenommenen vestibulären Reiz. Der kurzzeitige Eindruck von Eigenbewegung zeigt, dass der optische Reiz im Sinne der multisensorischen Verarbeitung stärker gewichtet wird. Dementsprechend trägt der visuelle Eindruck maßgeblich zur Einschätzung von Bewegungen, insbesondere der Wahrnehmung von Geschwindigkeit, bei.

Da sich die Vorgänge des optischen Flusses vorwiegend im peripheren Sichtfeld abspielen, ist für die Wahrnehmung dessen eine ausreichend hohe Abdeckung des Sichtfeldes erforderlich. Der Mensch sieht in der Horizontalen etwa 180° und kann durch Drehung der Augen einen Bereich von 220° abdecken. In vertikaler Richtung erstreckt sich der sichtbare Bereich ausgehend von der Horizontalen um 55° nach oben und um 80° nach unten [63, S. 57]. Jamson, der horizontale Abdeckungen bis 120° untersuchte, berichtet, dass eine höhere Sichtfeldabdeckung zu einer verbesserten Geschwindigkeitseinschätzung führt [72, 73]. Zum gleichen Ergebnis kommt Correia, der einen Vergleich von zwei Sichtfeldern mit 41° und

120° durchführte [30]. Colombet u. a., die das Sichtfeld (150°) in ihrer Untersuchung unverändert ließen und stattdessen den dargestellten Bildausschnitt vergrößerten, kommen zu der Erkenntnis, dass ein größerer Bildausschnitt, was vergleichbar mit einer Vergrößerung des Sichtfeldes ist, ebenfalls die Geschwindigkeitseinschätzung verbessert [29]. Demgegenüber konnte Pretto, der den Einfluss der Darstellung von Nebel zur Einschränkung des Sichtfeldes untersucht, überraschenderweise keine verbesserte Geschwindigkeitseinschätzung oberhalb von 40° feststellen [111]. In einem Punkt kommen die genannten Untersuchungen zu einem übereinstimmenden Ergebnis. Ohne Geschwindigkeitsanzeige kommt es im Simulator zu einer Unterschätzung der Geschwindigkeit. Dieses Phänomen tritt ebenfalls in kontrollierten Feldstudien auf, wie sich in einer Arbeit von Schütz u. a. mit Fahrern und Beifahrern zeigt [128]. In einer Studie von Bos u. a. unterschätzen Beifahrer mit uneingeschränktem Sichtfeld verschiedene Geschwindigkeiten im Schnitt um $5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ [17]. Das Ergebnis änderte sich nicht signifikant durch das Tragen eines Head-Mounted-Display (HMD), welches den Probanden im Fahrzeug die live aufgezeichnete Szene auf einem Sichtfeld von 40° darstellte. Ein direkter Vergleich zwischen kontrolliertem Feld (freies Sichtfeld) und simulierter Versuchsumgebung (150° Sichtfeld) von Hurwitz hingegen zeigt, dass dieser Effekt im Simulator signifikant stärker ausgeprägt ist [68]. In einer vergleichbaren Untersuchung von Panerai, die innerhalb eines Lkw-Simulators mit einer sehr großen Abdeckung von 180° stattgefunden hat, zeigten Probanden eine ähnliche Geschwindigkeitseinschätzung wie im Feld [106]. Es ist daher zu vermuten, dass eine vollständige horizontale Abdeckung des menschlichen Sichtfeldes erforderlich ist. Eine Vorgabe für die notwendige Abdeckung existiert jedoch bisher nicht. Dies ist auf die Unterschiede der technischen Rahmenbedingungen und Studiendesigns zurückzuführen. Erschwerend zur Ermittlung eines konkreten Wertes kommt hinzu, dass es durch höhere Geschwindigkeiten neben dem optischen Fluss, welcher einen rein physiologischen Effekt darstellt, zu einer unbewussten psychologischen Einengung des Gesichtsfeldes kommt. Diese ist auf eine Aufmerksamkeitsverlagerung auf einen weiter entfernt gelegene Fixationspunkte zurückzuführen [61, S. 44]. Bei sehr hohen Geschwindigkeit könnte somit auch eine geringe Abdeckung ausreichend sein.

Neben dem Sichtfeld müssen bei der Auslegung eines Sichtsystems die Tiefenwahrnehmung und das Auflösungsvermögen der Augen Berücksichtigung finden. Während die Informationen der Tiefenwahrnehmung v. a. für die Einschätzung von Distanz und zur Bewältigung von Bahnführungsaufgaben [74, S. 17]

erforderlich sind, führt eine Erhöhung der Auflösung neben einer verbesserten Erkennbarkeit der virtuell dargestellten Elemente v. a. zu einer Steigerung des Realitätsgrads. Die Auflösung beträgt etwa eine Bogenminute, d. h. bei einem Abstand von 10 m kann ein Unterschied bis 3 mm erkannt werden [126, S. 266]. Jedoch beschränkt sich dieser Bereich in der Horizontalen und Vertikalen auf ein Feld von jeweils 2° um den Fixationspunkt herum. Im peripheren Sichtfeld fällt dieser Wert auf ein Vierzigstel ab [63, S. 57]. Zur Tiefenwahrnehmung nutzt der Mensch mehrere Mechanismen, die meist unbewusst ablaufen. Für Bereiche bis max. 10 m erfolgt die Tiefenschätzung vorwiegend durch die simultane Parallaxe (Stereosehen). Durch die leicht verschobenen Bilder in beiden Augen berechnet das Hirn auf Grundlage von Erfahrungen die Tiefe. Über diesen Bereich hinaus kommt die Bewegungsparallaxe zum Tragen. Diese beruht auf dem Effekt, dass sich nahe Objekte schneller über die Netzhaut bewegen als weiter entfernte. Ergänzt wird die Abstandswahrnehmung durch die Akkomodation, das Scharfstellen des Auges. Die zum Fokussieren eines Bildpunktes notwendige Krümmung der Linse liefert dem Hirn zusätzliche Informationen und findet altersabhängig in einem Bereich von etwa 0,1 m (maximale Anspannung) bis 5 m (vollständige Entspannung) statt [55, S. 22].

Aufgrund der zu Beginn der Arbeit erläuterten Skalierung von Beschleunigungen stellt sich in der Fahrsimulation die Frage, in welchem Verhältnis die visuell wahrgenommene Geschwindigkeit und die vestibulär wahrgenommene Beschleunigung in einem dynamischen Simulator skaliert werden müssen, um einen realistischen Eindruck zu bewahren. Betrachtet man in diesem Zusammenhang Studien, muss hinsichtlich der Untersuchungsmethode zwischen longitudinalen und lateralen Untersuchungen differenziert werden.

Im querdynamischen Bereich gibt es eine Vielzahl an Untersuchungen, die einen Zusammenhang mit der Frequenz der Drehbewegung des Probanden bilden. Es zeigt sich, dass das visuelle System eher sensitiv auf niederfrequente Beschleunigungen reagiert und in diesem Bereich das vestibuläre System dominiert [152, S. 265]. Eine grundlegende Erkenntnis ist, dass die visuellen und vestibulären Reize physikalisch nicht exakt zusammenpassen müssen, um in einer Simulation einen stimmigen querdynamischen Gesamteindruck zu erzeugen. Steen bezeichnet den als realistisch empfundenen Bereich als Kohärenzzone und stellt eine breite Streuung in Abhängigkeit von der Frequenz und der Amplitude fest [143, S. 155]. Unterstützt wird diese Hypothese durch weitere Studien und Untersuchungen [31, S. 81 und S. 146] [93].

Die Verhältnisermittlung der longitudinalen Bewegungswahrnehmung erfolgt nicht anhand von Sinusprofilen. Stattdessen werden unterschiedlich hohe sigmoidal verlaufende Beschleunigungssprünge kombiniert mit einem unveränderten Geschwindigkeitsprofil dargestellt. Im Rahmen einer solchen Studie von Berger bewerteten Probanden die Simulation als am besten, wenn die vestibulären und visuellen Reize physikalisch konsistent dargestellt werden [12]. In einer weiteren Studie zeigte sich, dass ähnlich wie in den querdynamischen Untersuchungen eine Kohärenzzone existiert, die die Konfiguration der physikalischen Übereinstimmung beider Reize jedoch mit einschließt [12]. Im Unterschied zu den querdynamischen Untersuchungen beinhaltet dieser Bereich jedoch lediglich vestibuläre Reize, deren Skalierung die des visuellen Reizes nicht überschreiten.

Hinsichtlich des Einflusses der visuellen Reize auf die Bewegungswahrnehmung ergibt sich ein sehr konsistentes Bild in der Literatur. Zur Vermittlung eines Bewegungseindrucks muss v. a. auf eine ausreichend hohe Sichtfeldabdeckung und Auflösung geachtet werden, um eine mit dem Fahrzeug vergleichbare Bewegungseinschätzung zu ermöglichen. Das Skalierungsverhältnis von vestibulären und visuellen Reizen erfordert aufgrund der Kohärenzzone keine exakte Übereinstimmung, schließt für Longitudinalbewegung jedoch die Konfiguration der exakten Übereinstimmung mit ein.

Auditives System

Mit dem Gehör ist der Mensch in der Lage, Schall im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und, je nach Alter, maximal 20.000 Hz zu hören [55]. Das Gehör besteht aus zwei Organen, die aufgrund der zeitlichen und spektralen Differenzen zwischen den beiden Eingangssignalen das Richtungshören, das Einschätzen von Entfernungen und die Beurteilung von Geräuschqualitäten ermöglichen [53, S. 39]. Im Fahrzeug haben die vom Gehör wahrgenommenen Reize Einfluss auf die Geschwindigkeits- und auf die Bewegungswahrnehmung. Dabei sind Geräusche im Bezug auf die Beschleunigungswahrnehmung, ein von Emotionen geprägtes Thema, das von der persönlichen Präferenz und der Erwartung abhängt. So kann bspw. die Rauigkeit während einer Beschleunigung zu einem dynamischen und kraftvollen Gesamteindruck beitragen, wohingegen eine kontinuierliche Exposition gewöhnlich als lästig empfunden wird [53, S. 74].

Sandin u. a. konnten in einer Simulatorstudie zeigen, dass dem Problem der Geschwindigkeitsunterschätzung durch das Darstellen von Geräuschen entgegen-

gewirkt werden kann [124]. Eine weitere Steigerung dieses Effekts kann durch die Lautstärke der Geräusche erfolgen. In einer Studie von Horswill und Plooy zeigt sich aufgrund einer Schalldruckpegelreduktion um 5 dB eine, um $5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ verringerte Geschwindigkeitsschätzung durch die Probanden [66].

Skoda u. a. führten Simulatorstudien zum Einfluss von Fahrzeuginnen-geräuschen auf die Bewertung der Beschleunigung durch [132]. Einer der Versuche besteht darin, die Auswirkung der Darstellung von Geräuschen fünf verschiedener Fahrzeugklassen auf die Wahrnehmung einer Beschleunigung zu untersuchen. Lediglich bei einer Gegenüberstellung eines nicht genauer spezifizierten Fahrzeugs mit Dieselmotor mit einem Oberklassefahrzeug bewerteten die Probanden die Beschleunigungsstärke des Oberklassefahrzeugs signifikant höher trotz gleichbleibender Beschleunigung. Skoda u. a. kommt zu dem Entschluss, dass dieses Resultat durch die Erfahrung und Erwartung der Probanden geprägt ist. In einem weiteren Versuch zeigt sich, dass die alleinige Lautstärkevariation und eine Bassanhebung keinen signifikanten Einfluss auf die Beschleunigungsbewertung hat. Hajek attestiert dem Motorgeräusch, gemäß einer durchgeführten Feldstudie mit einem Elektrofahrzeug und synthetischen Geräuschen, einen stark anregenden Einfluss, worunter eine erhöhte Intensität des Fahrerlebnisses zu verstehen ist [60, S. 25, S. 157]. Ob dies als Steigerung der Beschleunigungsstärke zu interpretieren ist, wird nicht thematisiert. Weitere Feldstudien führte Müller mit gedrosselten Motorkonfigurationen durch. Der Vergleich von zwei Untersuchungen zur Unterscheidbarkeit von Beschleunigungsänderungen mit und ohne Geräuschkulisse ergibt keinen signifikanten Unterschied [101, S. 151]. Zur Untersuchung des „Gefallen“-Aspekts führte Müller zudem Versuche mit gedrosselten Motorkonfigurationen und gleichbleibenden Geräuschen durch [101, S. 95]. Die Probanden bewerteten zunehmende Divergenzen als negativ, was auf eine Diskrepanz zwischen der Erwartung und dem Erlebten zurückzuführen ist.

Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich das Fazit ziehen, dass die akustischen Reize in der Bewegungswahrnehmung lediglich ein unterstützendes Element sind. Dabei scheint die Auswirkung auf die korrekte Einschätzung der Geschwindigkeit größer zu sein als auf die der Beschleunigung. Im Bezug auf die Beschleunigungen treten eher emotionale Aspekte in den Vordergrund. Die erlebten Geräusche müssen erwartungskonform zum Fahrzeugtyp und zum Betriebszustand passen, da es ansonsten zu Irritationen kommt. Aus dieser engen Verknüpfung zwischen Geräuschen und dynamischem Fahrverhalten wird für die Entwicklung des Fahr-simulators geschlossen, dass ein gänzlicher Verzicht auf fahrdynamische Geräusche

eine höhere Akzeptanz erreicht als die Darstellung nicht abgestimmter akustischer Reize.

Somatosensorisches System

Das somatosensorische System fasst drei Körpersinne zusammen. Dazu zählen der Hautsinn, der es ermöglicht Berührungen und Schmerzen durch Stimulierung der Haut wahrzunehmen, die Propriozeption, die Informationen über die Position des Körpers liefert, und die Kinästhesie, welche über den Bewegungszustand des Körpers informiert [55, S. 332]. Durch die Rezeptoren des Hautsinns nehmen Menschen Vibrationen wahr, die, ähnlich wie die akustischen Reize, aufgrund unserer Erfahrung und Erwartung Aufschluss über die Fahrgeschwindigkeit oder die Beschleunigung geben können. Die Verteilung dieser Rezeptoren ist am menschlichen Körper nicht homogen. Damit verbunden ist eine besonders hohe Sinnesleistung in den Hand- und Fußflächen aufgrund einer erhöhten Dichte an Mechanorezeptoren [125, S. 307]. Der Mensch ist in der Lage Frequenzen bis etwa 1000 Hz wahrzunehmen, wobei die höchste Empfindlichkeit im Bereich von 100 Hz bis 300 Hz liegt [78, S. 46].

Im Bezug auf die Geschwindigkeitswahrnehmung erwähnt Negele in seiner Arbeit, dass der Eindruck des „Schwebens“ entstehen kann, wenn dynamische Simulationen ohne fahrbahninduzierte Schwingungen durchgeführt werden, thematisiert dies jedoch nicht weiter [102, S. 51]. Ahlström u. a. berichten von einem positiven Effekt von Vibrationen auf die Einschätzung der gefahrenen Geschwindigkeit im Rahmen einer Validierungsstudie [1, S. 29]. Es wird vermutet, dass sich entsprechende Reize ähnlich wie akustische Reize auf die Wahrnehmung auswirken.

Neben den Vibrationen liefern die durch den Sitz auf die Hautoberfläche wirkenden Drücke und die teilweise unbewusste Anspannung von Muskeln Informationen über die wirkende Beschleunigung. Da es sehr aufwendig ist, die vestibulär wirkenden Reize und die somatosensorisch wahrgenommenen Drücke entkoppelt voneinander zu untersuchen, ist nicht gänzlich bekannt, zu welchen Anteilen eine Beschleunigung somatosensorisch und vestibulär wahrgenommen wird. Bringoux u. a. untersuchen den Beitrag vestibulärer und somatosensorischer Reize auf die Wahrnehmung der Körperorientierung beim Neigen (Nicken) des gesamten Körpers mit sehr langsamen Rotationsraten [20]. Dazu wurde die Probanden liegend auf zwei verschiedene Arten auf einer zu Beginn stehenden, neigbaren Plattform

fixiert. Die erste Einspannung erfolgte mit mehreren Gurten und die zweite durch einen Ganzkörperanzug, der durch einen konstanten Druck schwerkraftbasierte somatosensorische Reize abschwächt. Die Ergebnisse des Experiments legen nahe, dass die schwerkraftbasierten somatosensorischen Reize wichtiger sind als die vestibulären zur Wahrnehmung einer quasistatischen Körperorientierung. Langsame Neigungen des Körpers werden somit vorwiegend durch die Drücke an den Kontaktflächen wahrgenommen.

In der dynamischen Fahrsimulation von besonderem Interesse ist die Kenntnis darüber, ob eine Bewegung aufgrund des Rucks oder der Beschleunigung wahrgenommen wird. Bekannt ist, dass der Ruck, d. h. der (positive) Gradient einer Beschleunigung, primär somatosensorisch durch das kurzzeitige in den Sitz gedrückt werden, wahrnehmbar ist [47, S. 9]. Mah u. a. führten eine Untersuchung durch, um die Detektierbarkeit horizontal dargestellter Sinusbeschleunigungen zu ermitteln [91]. Dazu nutzen Sie einen aktuierten Schlitten und verringern den Einfluss somatosensorischer Reize, indem sie drucknachlassende Schaumpolsterung an allen Kontaktstellen des Körpers verwenden. Im Vergleich zu Untersuchungen von Benson [11] weisen die von ihnen ermittelten Werte eine verschlechterte Detektierbarkeit mit ansteigender Frequenz auf, was auf eine aufgrund der Polsterung, verringerte Abhängigkeit vom Ruck zurückzuführen ist. Soyka untersucht die Detektierbarkeit von drei Beschleunigungsprofilen zur Darstellung eines sigmoidalen Positionssprungs in einem Simulator [136]. Am schwierigsten fällt es den Probanden, das Profil mit dem geringsten Ruck zu ermitteln, obwohl dieses die höchste Beschleunigung erreicht. Untersuchungen zu Reizverarbeitungszeiten zeigen weiterhin, dass die Verarbeitung eines somatosensorischen Reizes etwa 120 ms bis 160 ms schneller abläuft als die eines vestibulären Reizes [3].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei den somatosensorischen Reizen zwischen den Vibrationen und den direkt mit der Beschleunigung verbundenen Reizen, allen voran dem Ruck und dem Druck an der Rückenfläche, differenziert werden muss. Während Vibrationen eher einen flankierenden Reiz zur Bewegungswahrnehmung darstellen, tragen die weiteren Reize maßgeblich dazu bei, den Bewegungszustand abzuschätzen. Um in einem Fahrsimulator unbemerkt Bewegungen auszuführen, muss daher neben der Beschleunigung der Ruck gering gehalten werden.

2.1.2 Wahrnehmungsschwellen

Zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit der menschlichen Wahrnehmung dienen Wahrnehmungsschwellenwerte. Mit diesen ist es möglich, die Beziehung zwischen Reiz und subjektivem Empfinden zu objektivieren [125, S. 288]. Zu unterscheiden ist zwischen der absoluten Wahrnehmungsschwelle (auch Reizschwelle genannt) und einer relativen Wahrnehmungsschwelle (auch Unterschiedsschwelle genannt). Die absolute Schwelle stellt die geringste Reizintensität dar, die bei einer bestimmten Reizkonfiguration zu einer Wahrnehmung führt. Die relative Wahrnehmungsschwelle drückt aus, wie sehr sich zwei Reize in der Intensität unterscheiden müssen, um zwischen diesen differenzieren zu können [7, S. 76].

Die Ermittlung der Schwellenwerte erfolgt in Probandenstudien und kann für eine Vielzahl von physikalischen Größen und alle vorgestellten Sinneskanäle erfolgen. Dafür stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, wovon die adaptiven die effizientesten sind. Bei diesen Verfahren wird in jedem Testschritt (Trial) eine Anpassung der Reizstärke basierend auf den vorherigen Antworten vorgenommen [79, S. 122]. Zur Untersuchung einer absoluten Wahrnehmungsschwelle der Beschleunigung erfährt ein Proband bspw. ein kurzes Beschleunigungsprofil einer bestimmten Stärke. Nimmt der Proband eine Beschleunigung wahr, muss die Stärke reduziert werden, nimmt er sich nicht wahr gilt das Umgekehrte. Somit ist es möglich, sich über mehrere Testschritte an die Wahrnehmungsschwelle heranzutasten. Anzumerken ist, dass zur Ermittlung einer absoluten Schwelle die Darstellung eines einzelnen Reizes pro Testschritt genügt, während die Ermittlung der relativen Schwelle immer einen Paarvergleich zwischen einem Referenzreiz und einem Vergleichsreiz erfordert.

In der Fahrsimulation ist die Kenntnis über absolute Schwellenwerte notwendig, um gezielt Bewegungen über- oder unterschwellig durchführen zu können. Die durch Versuche ermittelten Wahrnehmungsschwellen unterscheiden sich teilweise sehr stark, was auf unterschiedliche Messmethoden, Testumgebungen, Erregungsformen und den zur Bewegungsermittlung teilhabenden Sinnesmodalitäten zurückzuführen ist. Hinzu kommt eine Frequenzabhängigkeit bei Untersuchungen mit Beschleunigungen in Form von Sinusschwingungen. Gundry wertet hierzu 18 Veröffentlichungen, mit Untersuchungsergebnissen zur absoluten Wahrnehmungsschwelle linearer periodischer Bewegungen, aus [58]. Er kommt zu der Erkenntnis, dass mit steigender Frequenz die absolute Wahrnehmungsschwelle geringer wird. Kingma führt diesen Effekt auf den zunehmenden Ruck und einen

größeren Beitrag des ruckempfindlichen somatosensorischen Systems zurück [80] was durch Untersuchungen von Heerspink bekräftigt wird [62]. Tabelle 2.1 stellt einige der im Rahmen einer Recherche gefundenen absoluten und relativen Wahrnehmungsschwellen dar mit Angabe der Testumgebung, des verwendeten Profils und der teilhabenden Sinnesmodalitäten. Aufgrund der zuvor genannten Gründe streuen die absoluten Wahrnehmungsschwellenwerte zu längsdynamischen Bewegungen im Bereich von $0,03 \frac{m}{s^2}$ bis $0,15 \frac{m}{s^2}$.

Tabelle 2.1: Wahrnehmungsschwellen

Autor	Typ	Jahr	Wert (Bedingung)	Umgebung	Profil	Modalitäten
Rockwell und Snider	absolut	1965	$\ddot{x}_{TH} = 0,15 \frac{m}{s^2}$ ($56 \frac{km}{h}$)	Fahrzeug	Beschl.	vestibulär & visuell
Kingma	absolut	2005	$\ddot{x}_{TH} = 0,088 \frac{m}{s^2}$ (0,1 Hz)	Schlitten	Sinus	vestibulär
Naseri	absolut	2012	$\ddot{x}_{TH} = 0,03 \frac{m}{s^2}$ (0,4 Hz)	Flugsim.	Sinus	vestibulär
Müller	relativ	2016	$\ddot{x}_{TH} = 0,07-0,13 \frac{m}{s^2}$ (bis $80 \frac{km}{h}$)	Fahrzeug	Anfahren	vestibulär, visuell, auditiv
Hosman	absolut	1976	$\ddot{\theta}_{TH} = 0,072 \frac{^\circ}{s^2}$ (0,1 Hz - 2,2 Hz)	Flugsim.	Sinus	vestibulär
Groen und Bles	absolut	2004	$\dot{\theta}_{TH} = 3 \frac{^\circ}{s}$	Fahrsim.	MCA	vestibulär, visuell
Chapron	absolut	2007	$\dot{\theta}_{TH} = 2 \frac{^\circ}{s}$ ($0 \frac{m}{s^2}$) $\dot{\theta}_{TH} = 6 \frac{^\circ}{s}$ ($1 \frac{m}{s^2}$) $\dot{\theta}_{TH} = 8 \frac{^\circ}{s}$ ($0 \frac{m}{s^2}$) $\dot{\theta}_{TH} = 11 \frac{^\circ}{s}$ ($1 \frac{m}{s^2}$)	Fahrsim.	MCA	vermutlich vestibulär, visuell

Zur Ermittlung von Schwellenwerten bei Drehbewegungen werden an Flug- und Fahrsimulatoren Untersuchungen durchgeführt mit dem Resultat, dass nicht die Drehbeschleunigung, sondern primär die Drehrate von den Bogengängen des vestibulären Systems detektiert wird [62]. In der Fahrsimulation erfolgen Rotationsbewegung zudem meist mit visueller Darstellung einer Horizontalbewegung, weshalb sich die Literaturrecherche auf Studien mit entsprechender Reizdarstellung beschränkt.

Nesti ermittelt im Simulator eine Roll-Drehrate von $6 \frac{\circ}{s}$, ab der Probanden berichten eine Drehung wahrgenommen zu haben. Die Probanden führen aktiv, d. h. selbstständig während der Untersuchung. Pretto und Fang bestätigen in eigenen Studien diesen Wert für Rollbewegungen [110, 44]. In einer Studie von Colombet u. a. zeigt sich ein vergleichbares Bild für Nickbewegungen [28]. Das Ergebnis lautet, dass 60 % der aktiv im Simulator fahrenden Probanden Nick-Drehraten unterhalb von $6 \frac{\circ}{s}$ nicht wahrnehmen. Anzumerken ist, dass die Rotation mit einer horizontalen Beschleunigung kombiniert dargestellt wurde. Wie sich in einer Studie von Chapron und Colinot zeigt, hat dies einen Einfluss auf den Schwellenwert. Sie geben in ihrer Arbeit an, dass sich die rotative Wahrnehmungsschwelle von $2 \frac{\circ}{s}$ auf $6 \frac{\circ}{s}$ anhebt, wenn die Rotationsbewegung durch eine horizontale Beschleunigung von $1 \frac{m}{s^2}$ überlagert wird [25]. Zudem ergeben sich Unterschiede in der Wahrnehmungsschwelle zwischen aktiv fahrenden Probanden und passiv im Simulator sitzenden. Für passives Fahren, worunter ein simuliertes autonomes Fahren zu verstehen ist, senkt sich der Schwellenwert auf $3 \frac{\circ}{s}$ ab, was auf eine geringere kognitive Auslastung im Vergleich zum aktiven Fahren zurückgeführt wird [104, 56].

Zusammenfassend zeigt sich im Bezug auf die Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen von Horizontalbewegungen ein uneinheitliches Bild. Konsistenter sind hingegen die Angaben zu den Rotationsschwellen. Deutlich wird, dass die Erkennung einer Rotationsbewegung von der Fahraufgabe (aktiv vs. passiv) und der Überlagerung mit einer Horizontalbewegung abhängig ist. Aktiv fahrende Probanden akzeptieren Drehraten von etwa $6 \frac{\circ}{s}$, während für passiv mitfahrende Probanden ein Wert von $3 \frac{\circ}{s}$ eingehalten werden sollte.

2.2 Tilt-Coordination

Um die Größe eines dynamischen Fahrsimulators in einem tragbaren Rahmen zu halten, ist es notwendig, die zu simulierenden Beschleunigungen teilweise durch Neigung darzustellen, der sogenannten Tilt-Coordination [123, S. 39]. Dabei wird eine Schwäche des vestibulären Systems ausgenutzt: Durch Entziehung einer optischen Referenz ist der Mensch nicht in der Lage zwischen Beschleunigungen aufgrund einer Lageänderung um die Quer- oder Längsachse und einer horizontalen Bewegung zu differenzieren. Zur genaueren Klärung des Begriffs der Tilt-Coordination soll zuerst die Bedeutung der spezifischen Kraft erläutert werden und deren Unterschied zur translatorischen Beschleunigung. Angelehnt an [86]

wird in dieser Arbeit unter einer translatorischen Beschleunigung $\mathbf{a} = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}]^T$ die zweite Ableitung der translatorischen Positionsänderung eines Körpers verstanden. Die spezifische Kraft $\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T$ ist definiert als die äußere Krafteinwirkung auf einen Körper, pro Masseneinheit dieses Körpers, die sich aus der Beschleunigung \mathbf{a} und der Gravitation $\mathbf{g} = [0, 0, g]^T$ ergibt. Angegeben wird die spezifische Kraft pro Einheit der Körpermasse. Definitionsgemäß ist sie im freien Fall Null, woraus sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\mathbf{f} = \mathbf{a} - \mathbf{g}, \quad [f] = \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (2.1)$$

Ein Beschleunigungssensor erfasst somit nicht alleine die translatorische Beschleunigung, sondern die spezifische Kraft, da er neben der Beschleunigung infolge der Positionsverschiebung auch der Gravitation ausgesetzt ist. In analoger Weise gilt dies für die menschlichen Rezeptoren zur Wahrnehmung von Beschleunigungen.

Nachfolgend soll erläutert werden, wie die im Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen in einem Simulator nachgebildet werden. Zunächst sollen dazu die verwendeten Bezugssysteme R beschrieben werden. Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegungen dient das mitbewegte Bezugssystem R_V , das sich relativ zu einem erdfesten Inertialsystem R_I bewegt. Ein dynamischer Simulator besteht in der Regel aus einer Plattform, die gegenüber dem Inertialsystem R_I verschieb- und neigbar ist. Um dies abzubilden, wird ein plattformfestes Bezugssystem R_P definiert. Zur Bewahrung der Übersicht beschränkt sich die folgende Betrachtung auf eine reine Längsbeschleunigung $\mathbf{a} = [\ddot{x}, 0, 0]$ in der Ebene und einer Angabe aller Größen als Skalare. Ausgangspunkt ist die linke Hälfte von Bild 2.3. Dargestellt sind die auf Kopfhöhe bzw. an der Kopfstütze wirkenden Beschleunigungen im fahrzeugfesten Bezugssystem R_V . Dies sind die translatorische Referenzbeschleunigung $\ddot{x}_{\text{ref}}^{(V)}$, die Gravitationsbeschleunigung g und die daraus resultierende spezifische Referenzkraft $f_{\text{ref}}^{(V)}$ mit der Orientierung α . Die Darstellung auf Kopfhöhe begründet sich mit der Lage des vestibulären Systems. Die Anteile wirken jedoch gleichermaßen auf den gesamten Körper eines Fahrers. Eine im Betrag oder in der Orientierung identische Beschleunigung kann in einem Simulator durch Neigung erzielt werden. Dazu ist in der rechten Bildhälfte von Bild 2.3 eine, gegenüber dem Inertialsystem R_I um den Winkel θ geneigte Plattform dargestellt. Ein Fahrer, der sich in dem plattformfesten Bezugssystem R_P befindet, nimmt eine resultierende spezifische Kraft $f_1^{(P)}$ wahr, die sich ausschließlich durch die Gravitation

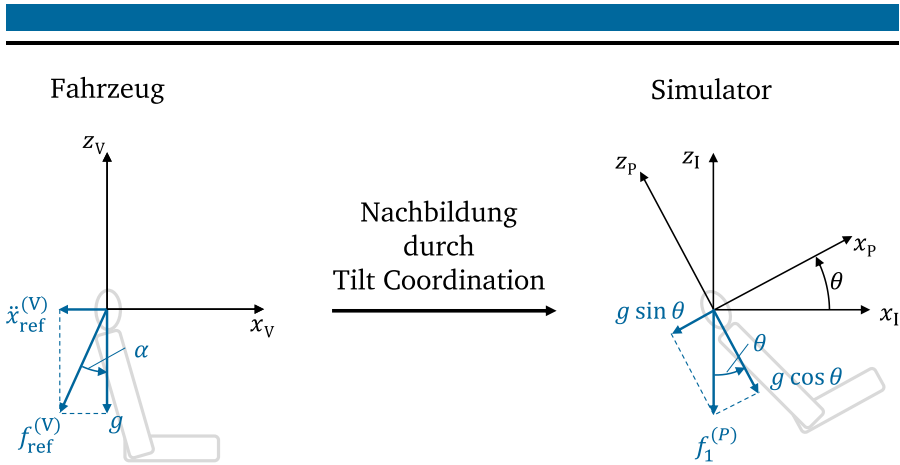


Bild 2.3: Nachbildung der im Fahrzeug erlebten spezifischen Kraft (links) durch die Tilt-Coordination (rechts)

ergibt. Die Tilt-Coordination kann nun so erfolgen, dass entweder eine Nachbildung des Betrags der Beschleunigung $\dot{x}_{\text{ref}}^{(V)}$ oder der Orientierung von $f_{\text{ref}}^{(V)}$ erzielt wird. Ist es das Ziel einen identischen Betrag ($|g \sin \theta| = |\dot{x}_{\text{ref}}^{(V)}|$) zu erhalten, so berechnet sich der Neigungswinkel θ anhand von

$$\theta_{tc,1} = \arcsin\left(\frac{\dot{x}_{\text{ref}}^{(V)}}{g}\right). \quad (2.2)$$

Die Orientierung ($\alpha = \theta$) bleibt erhalten durch

$$\theta_{tc,2} = \arctan\left(\frac{\dot{x}_{\text{ref}}^{(V)}}{g}\right). \quad (2.3)$$

Sammet zufolge ist der korrekten Nachbildung der Orientierung ein höherer Stellenwert beizumessen [123, S. 40]. Daher sollte bevorzugt der in Gleichung (2.3) beschriebene Zusammenhang für die Tilt-Coordination verwendet werden. Die Simulation einer Beschleunigung kann jedoch nicht durch beliebig große Neigungswinkel erfolgen. Der Winkel θ sollte einen Bereich von 20° bis 30° nicht überschreiten [102, S. 40], [97], [34, S. 15], da eine Darstellung einer Beschleunigung durch betragsmäßig größere Neigungswinkel aufgrund des zu geringen virtuellen Gravitationsanteils ($g \cos \theta$) nicht als solche vom Fahrer interpretiert wird.

Des Weiteren treten im instationären Fall, d. h., wenn die zum Erreichen des Neigungswinkels erforderlichen Rotationsgeschwindigkeiten und Rotationsbeschleunigungen nicht Null sind, parasitäre Beschleunigungsanteile auf. Die Ausprägung dieser Anteile ist von der Lage des Drehzentrums der Tilt-Coordination abhängig und kann dem Fahrer ebenfalls Aufschluss über die tatsächliche Bewegungsform geben. Zur Veranschaulichung ist im linken Teil von Bild 2.4 die Tilt-Coordination um einen Drehpunkt oberhalb des Fahrerkopfes dargestellt. Der Kopf des Fahrers beschreibt eine Kreisbahn mit dem Radius l um das Drehzentrum. Die Fliehbeschleunigungen treten infolge der Relativbewegung zwischen dem Plattform- und Inertialbezugssystem auf und sind vestibulär und somatosensorisch wahrnehmbar. Dabei handelt es sich um eine Eulerbeschleunigung $l\ddot{\theta}$, die in Richtung der Koordinate x_p wirkt und eine Zentrifugalbeschleunigung $l\dot{\theta}^2$ die in Richtung der Koordinate z_p wirkt. Da diese Anteile für Radien $l > 0$ die gleiche Orientierung wie die gewünschten stationären Beschleunigungsanteilen aufweisen, sind sie nicht zwangsläufig als negativ zu interpretieren. Radien $l \ll 0$ sollten jedoch aufgrund der Umkehr der Wirkrichtung der Anteile $l\ddot{\theta}$ und $l\dot{\theta}^2$ vermieden werden. Bezogen auf das vestibuläre System lassen sich diese Anteile

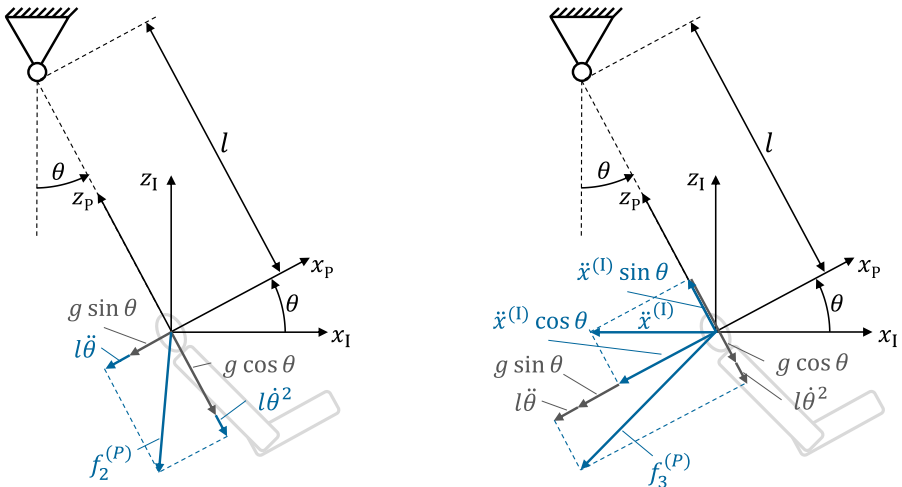


Bild 2.4: Änderung der wahrgenommenen spezifischen Kraft aufgrund zusätzlicher Fliehbeschleunigung (links) und einer zusätzlichen translatorischen Beschleunigung (rechts).

le gänzlich eliminieren, wenn der Drehpunkt der Tilt-Coordination auf Kopfhöhe liegt. Dies oder zumindest eine Drehpunktlage nahe des Kopfes ist folglich anzustreben, sodass der Einfluss von Fliehbeschleunigungen vernachlässigt werden kann.

Abschließend erfolgt eine Betrachtung der Beschleunigungsanteile resultierend aus einer Überlagerung der Tilt-Coordination mit einer horizontalen Längsbeschleunigung $\ddot{x}^{(1)}$ der gesamten Plattform. In der rechten Hälfte von Bild 2.4 ist neben den zuvor genannten Anteilen die Beschleunigung $\ddot{x}^{(1)}$ dargestellt. Anhand des Bildes wird die ungünstige Wirkrichtung der Komponente $\ddot{x}^{(1)} \sin \theta$ deutlich. Diese ist den anderen Anteilen entgegen gerichtet und verursacht beim Fahrer ein Gefühl der Schwerelosigkeit. Demzufolge sollte darauf geachtet werden, die Kombination hoher Neigungswinkel und starker translatorischer Beschleunigungen zu vermeiden. Letztlich ergibt sich auf der Plattform eine simulierte Beschleunigung entsprechend folgender Gleichungen:

$$\ddot{x}^{(P)} = \ddot{x}^{(1)} \cos \theta + g \sin \theta + l \ddot{\theta} \quad (2.4)$$

$$\ddot{z}^{(P)} = \ddot{x}^{(1)} \sin \theta - g \cos \theta - l \dot{\theta}^2 \quad (2.5)$$

2.3 Einfluss der Drehzentrumslage und der Tilt-Coordination auf die Beschleunigungswahrnehmung

Die theoretische Betrachtung des Einflusses der Drehzentrumslage konnte durch experimentelle Untersuchungen nicht gänzlich bestätigt werden. In einer Untersuchung zu unterschiedlichen Drehzentrumslage von Fischer konnten bei langsamen Neigungsbewegungen, d. h. Bewegungen unterhalb der Wahrnehmungsschwellen, keine signifikanten Unterschiede in der Beurteilung der Beschleunigungsgüte festgestellt werden [46]. Ein ähnlicher Versuch mit Rotationsbewegungen, die Anteile oberhalb der Wahrnehmungsschwelle beinhalten, zeigte sich eine Tendenz, dass auf Kopfhöhe liegende Drehzentren besser bewertet werden als Drehzentren unterhalb des Kopfes [48]. Ungeklärt ist, wie sich ein Drehzentrum, das deutlich oberhalb des Kopfes liegt, von Fahrern wahrgenommen wird.

Nicht gänzlich geklärt ist zudem, ob die Tilt-Coordination zu einer veränderten Wahrnehmung der Beschleunigungen und Verzögerungen führt. Stratulat u. a. untersuchten den Einfluss verschiedener Verhältnisse von Tilt-Coordination

zu Horizontalbewegungen auf die wahrgenommene Intensität einer im Betrag gleichbleibenden Verzögerung [138, 140]. Für höhere Verzögerungen ($1,4 \frac{m}{s^2}$) zeigt sich die Tendenz, dass mit der Zunahme des Neigungsanteils die Bremsstärke zu intensiv wahrgenommen wird. Für niedrige Verzögerung ($0,6 \frac{m}{s^2}$) ergibt sich der umgekehrte Effekt. Gemäß einer vergleichbare Untersuchung von Stratalat u. a. gilt dies nicht für positive Beschleunigungen [139]. Sie kommen daher zu dem Entschluss, dass die Darstellung von Verzögerungen und Beschleunigungen im Simulator nicht gleich behandelt werden können. Die Ursache für die Unterschiede in der Wahrnehmung ist nicht bekannt. Weitere Studien zu diesem Themenfeld konnten im Rahmen der Literaturrecherche nicht gefunden werden, weshalb weiterer Forschungsbedarf gesehen wird.

2.4 Motion-Cueing-Algorithmen

Der Begriff Motion-Cueing-Algorithmen (MCA) beschreibt im Allgemeinen einen Ansteuerungsalgorithmus eines dynamischen Fahrsimulators zur Darstellung von Beschleunigungen. Übersetzt bedeutet der Begriff „Motion-Cue“ soviel wie „Bewegungsreiz“, was zunächst sämtliche sensorischen Stimuli umfasst. Im Rahmen der Fahrzeugsimulation wird unter diesem Begriff meist nur die vestibuläre Reizung verstanden [123, S. 15] [74, S. XVI]. Die Einordnung des MCA in den Funktionsablauf eines dynamischen Simulators zeigt Bild 2.5. Der MCA übernimmt die

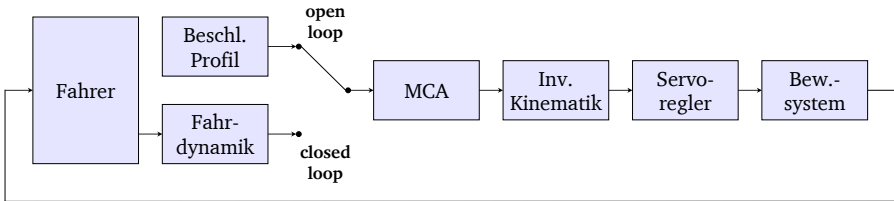


Bild 2.5: Einordnung des MCA in den Funktionsablauf eines Simulators und Unterschied zwischen Open-Loop und Closed-Loop-Simulation

Aufgabe, die Tilt-Coordination zu erzeugen, und stellt somit ein Bindeglied zwischen den darzustellenden Beschleunigungen und den Ansteuerungssignalen an die Aktoren dar. Dem MCA ist eine inv. Kinematik nachgelagert zur Umrechnung der Plattformkoordinaten in die Aktorkoordinaten. In der Regel werden letztgenannte als Sollgrößen an einen Servoregler gesendet, der die Regelung des Be-

wegungssystem übernimmt. Die dargestellten Bewegungen sind wiederum vom Fahrer wahrnehmbar und lösen bei ihm Reaktionen aus.

Für die Auslegung von MCA sind die Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems (Dynamik und Arbeitsraum) und die Funktionsweise der menschlichen Wahrnehmung zu berücksichtigen. Zudem ist ein entscheidender Faktor, ob der Fahrer aktiv die simulierte Fahrt beeinflussen können soll (Closed-Loop-Simulation oder Driver-In-The-Loop-Simulation), oder, ob er passiv, d. h. ohne Interaktionsmöglichkeit (Open-Loop-Simulation oder Driver-Out-Of-The-Loop-Simulation) die Simulation erlebt (vgl. Bild 2.5). Entscheidend für die Auslegung des Algorithmus ist dies insofern, da bei einer passiven Fahrt eine vollständige Ausnutzung der Darstellungsgrenzen des Simulators aufgrund des bekannten Fahr Szenarios möglich ist. Für aktive Fahrten ist das bestimmende Auslegungskriterium das erdenkliche Szenario, welches infolge der Eingaben des Fahrers die Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems am stärksten beansprucht, auch wenn die Auftretenswahrscheinlichkeit gering ist. Aus diesem Grund werden bei aktiven Fahrten für gewöhnlich deutlich geringe Beschleunigungen simuliert.

Im Folgenden werden zwei MCA diskutiert. Zum einen ist das der Classical-Washout-Algorithmus dessen Struktur die Basis für viele weitere Algorithmen bildet, zum anderen sind es modellprädiktive Ansätze, deren Tauglichkeit für Closed-Loop-Simulationen zwar beschränkt sind, jedoch gegenüber dem Classical-Washout-Algorithmus und dessen Derivaten eine deutlich bessere Bauraumausnutzung versprechen.

2.4.1 Classical-Washout-Algorithmus

Der Classical-Washout-Algorithmus wurde von Schmidt und Conrad [127] für die Verwendung in Flugsimulatoren entwickelt. Das Grundprinzip des Algorithmus ist eine Aufteilung der darzustellenden Beschleunigungen in nieder- und hochfrequente Anteile durch Tief- bzw. Hochpassfilterung. Die resultierenden hochfrequenten Signalanteile werden durch die translatorischen Freiheitsgrade dargestellt, die niederfrequenten Anteile durch die rotativen. Die Struktur des Algorithmus ist in Bild 2.6 in seiner allgemeinen Form dargestellt und lässt sich in einen oberen und einen unteren Signalpfad unterteilen. Eingangssignal des oberen Pfades ist die im Fahrzeug wahrgenommene Beschleunigung, ausgedrückt als spezifische Kraft f_{ref} entsprechend der zuvor eingeführten Gleichung (2.1). Im unteren Pfad sind die Winkelgeschwindigkeiten $\omega_{\text{ref}}^{(P)} = [\dot{\varphi}_V, \dot{\theta}_V, \dot{\psi}_V]^T$ das Eingangssignal. Zur

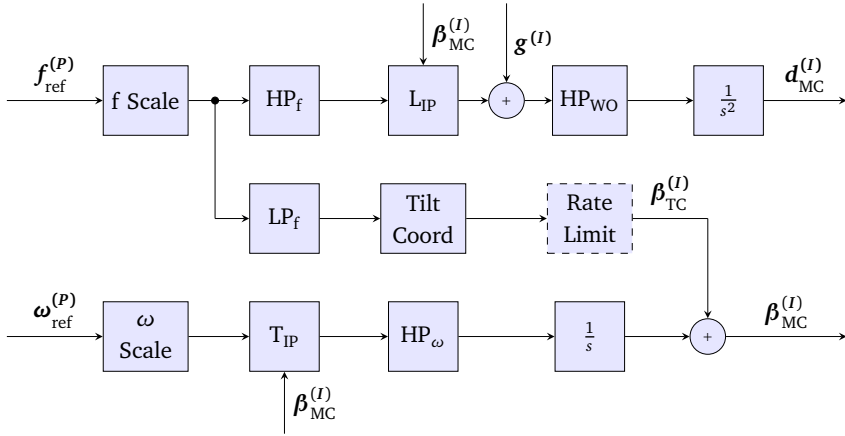


Bild 2.6: Struktur des Classical-Washout-Algorithmus aus [116, S. 5.25ff], entnommen und angepasst aus [47, S. 29]

Einhaltung der Arbeitsraumgrenzen werden diese Signale zuerst skaliert und ggf. begrenzt. Im oberen Pfad folgt daraufhin die Filterung mit einem Hochpassfilter HP_f zur Entfernung der niederfrequenten Signalanteile. Anschließend erfolgt eine Transformation vom plattformfesten ins inertielle Bezugssystem mit der Rotationsmatrix L_{IP} . Die Herleitung der Matrix kann der Arbeit von Sammet entnommen werden [123, S. 26]. Die Transformation ist notwendig aufgrund der zum Inertialsystem veränderten Orientierung um den Plattformdrehwinkelvektor $\beta_{MC}^{(I)}$. Anschließend wird die Gravitationsbeschleunigung $g^{(I)}$ aufaddiert und der sogenannte Washout-Hochpassfilter HP_{WO} angewandt. Bezogen auf die horizontale Position des Simulators bewirkt dieser ein Zurückkehren zum Ursprung des inertialen Koordinatensystems. Eine zweifache Integration des Beschleunigungssignals ergibt schließlich die horizontale Position des Simulators $d_{MC}^{(I)} = [x, y, z]$. Die durch den Tiefpassfilter LP_f aus der spezifischen Kraft f_{ref} gewonnenen niederfrequenten Anteile werden als Drehwinkel β_{TC} auf den unteren Pfad addiert.

Dazu wird der durch Gleichung (2.2) oder (2.3) beschriebene Zusammenhang angewendet:

$$\beta_{TC,1}^{(I)} = \arcsin\left(\frac{f_{\text{ref, LP}}}{g}\right),$$

$$\beta_{TC,2}^{(I)} = \arctan\left(\frac{f_{\text{ref, LP}}}{g}\right).$$

Zur Begrenzung der Drehraten kann optional eine Drehraten-Begrenzung (Rate Limit) eingesetzt werden. Die skalierten Winkelgeschwindigkeiten $\omega_{\text{ref}}^{(P)}$ des unteren Pfads werden mit der Rotationsmatrix T_{IP} transformiert und mit dem Hochpassfilter HP_{ω} von Konstantanteilen bereinigt. Nach einer einfachen Integration werden diese dem Ausgangssignal der Tilt-Coordination hinzu addiert, woraus sich in der Summe der Plattformdrehwinkelvektor $\beta_{MC}^{(I)}$ ergibt.

Die Filterwerte HP_f , HP_{ω_0} , LP_f und HP_{ω} müssen in Abhängigkeit der Eingangssignale auf den zur Verfügung stehenden Arbeitsraum des Bewegungssystems angepasst werden. Hinzu kommt, dass insbesondere für den Pfad der Tilt-Coordination die in Unterabschnitt 2.1.2 diskutierten menschlichen Wahrnehmungsschwellen zu berücksichtigen sind. Die Auslegung sollte so erfolgen, dass die Verwendung der Drehratenbegrenzung nicht erforderlich ist, da der durch das Erreichen der Begrenzung entstehende Ruck in der Rotationsbewegung vom Fahrer wahrgenommen werden kann.

Die Stärken des Classical-Washout-Algorithmus sind die uneingeschränkte Verwendbarkeit für Open-Loop-Simulationen und die klare physikalische Bedeutung der, gemessen an anderen Algorithmen, geringen Anzahl an Parametern. Nachteilig sind die fehlende Möglichkeit, die Arbeitsraumgrenzen des Simulators und die Wahrnehmungsschwellen direkt im Entwurf des Algorithmus zu berücksichtigen, und der damit verbundene Aufwand zu Parametrierung. Aufgrund der rotativen Wahrnehmungsschwellen ist der durch Neigung dargestellte Beschleunigungsanteil eher gering. Lediglich bei lang andauernden Beschleunigungen leistet diese einen merklichen Beitrag, weshalb häufig zugunsten der darstellbaren Dynamik eine Überschreitung der Wahrnehmungsschwellen bewusst hingenommen wird. Die translatorischen Wahrnehmungsschwellen stellen ebenfalls eine Einschränkung dar, da diese es nicht erlauben, den Schlitten mit deutlich darüber liegenden Beschleunigung in die Neutrallage zurückkehren zu lassen. Der horizontale Stellweg ist folglich schnell „aufgebraucht“. Üblicherweise muss daher bei Verwendung dieser Algorithmus-Klasse eine Skalierung verwendet werden die, deut-

lich unterhalb von 1 liegt. Der niedrigste Wert der, nach Literaturangaben, als realistisch empfunden wird liegt bei 0,35 [57].

2.4.2 Ansätze basierend auf modellprädiktiver Regelung

Die Struktur der aus der Regelungstechnik bekannten modellprädiktive Ansätze kann als Basis für MCA dienen. Nachfolgend wird zunächst das grundlegende Prinzip eines modellprädiktiven Reglers (MPC) erläutert, bevor auf dessen Einsatz als MCA eingegangen wird.

Modellprädiktive Regelung

Der Ursprung von modellprädiktiven Regelungen geht zurück auf die 70er Jahre [33, S. 55]. Der Ansatz beschreibt keine festgelegte Regelstruktur, sondern das Vorgehen zur Regelung eines Systems unter Zuhilfenahme eines Systemmodells und der dadurch möglichen Prädiktion des Systemverhaltens. Nach Camacho und Bordens [24, S. 1] ist die Familie der MPC-basierten Ansätze durch folgende Elemente charakterisiert:

- Verwendung eines Modells zur Vorhersage der Prozessausgänge zukünftiger Zeitpunkte (Horizont).
- Berechnung einer Steuerfolge durch Minimierung einer Kostenfunktion.
- Ein gleitender Horizont, der zu jedem Abtastschritt Richtung Zukunft verschoben wird, woraus die Einprägung des ersten Elements der berechneten Steuerfolge in das System resultiert.

Bild 2.7 a) veranschaulicht das Funktionsprinzip des MPC. Zur Vorhersage des Systemverhaltens muss ein Prozess- bzw. Systemmodell vorliegen und dessen Zustände bekannt sein. Die Vorhersage des Systemverhaltens erfolgt für einen festgelegten Zeitraum, den sogenannten Vorhersagehorizont, der, entsprechend Bild 2.7 a), N_p zeitdiskrete Schritte umfasst. Der Laufindex k markiert dabei den aktuellen Berechnungsschritt. Das zukünftige Verhalten des Systems wird durch die noch zu berechnende Steuerfolge beeinflusst deren Länge in den meisten Fällen der Länge des Vorhersagehorizonts entspricht. Die Steuerfolge soll bewirken, dass sich der Ausgang des Systems entsprechend der vorgegebenen Referenzwerte verhält.

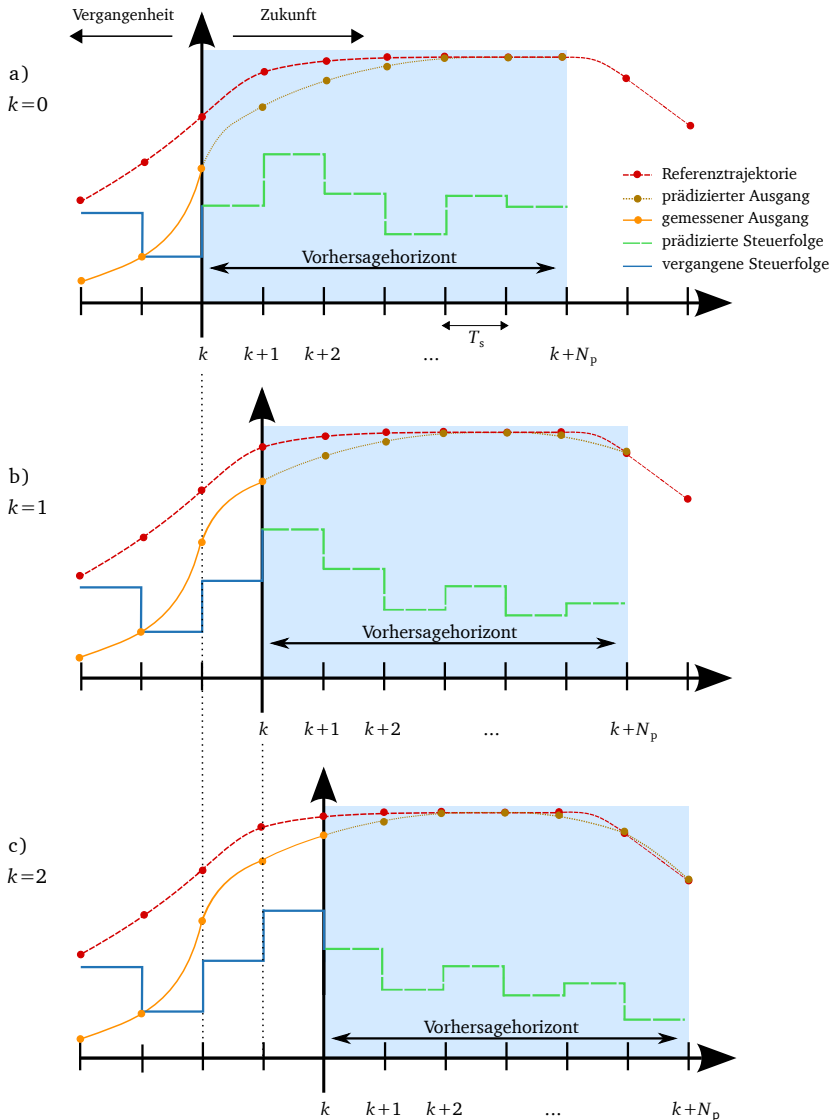


Bild 2.7: Veranschaulichung des MPC im zeitlichen Verlauf: a) zum Zeitpunkt $k = 0$ b) nach einem Abtastschritt c) nach zwei Abtastschritten, (verändert) [9].

Dazu wird eine Kostenfunktion aufgestellt, welche die Abweichung des Systems zur Referenztrajektorie bzw. -beschleunigung der nächsten N_p Schritte enthält. Die Minimierung der Kostenfunktion erfolgt durch das Anpassen der Steuerfolge. Für Systeme ohne jegliche Beschränkungen lässt sich eine optimale Steuerfolge explizit berechnen [151]. Existieren jedoch Systembeschränkungen, so muss die Minimierung durch ein iteratives Verfahren geschehen. Das Ergebnis der Minimierung ist eine Steuerfolge, von der das erste Element als Eingangswert für das System verwendet wird.

Abbildung 2.7 b) zeigt das Verhalten des MPC zum zweiten Abtastschritt, also nach Ablauf einer Zykluszeit T_s . Im zurückliegenden Schritt wurde der erste Wert der berechneten Steuerfolge an das System als Eingang weitergegeben und alle anderen Werte verworfen. Zum nun aktuellen Zeitpunkt $k = 1$ und den darauffolgenden wiederholt sich das Vorgehen. Der Vorhersagehorizont hat dabei stets die gleiche Länge.

Ein zusammenfassender, sehr kompakter Überblick über die Entwicklung von MPCs ist in [121] gegeben, während [24] eine ausführliche Beschreibung über verschiedene Algorithmen, ihre Umsetzung und Beispiele liefert.

Modellprädiktive Motion-Cueing-Algorithmen

Angewendet als MCA gilt es zum Zeitpunkt k mit der Kostenfunktion J die Differenz zwischen einer Referenzbeschleunigung \ddot{x}_{ref} und der auf der Bewegungsplattform wahrgenommenen Beschleunigung $\ddot{x}^{(P)}$ innerhalb des Vorhersagehorizonts der Länge N_p zu minimieren [32]:

$$\min J = \sum_{j=1}^{N_p} |\ddot{x}^{(P)} - \ddot{x}_{\text{ref}}|_{k+j}^2 \quad (2.6)$$

Ein Vorteil der sich ergibt und gegenüber klassischen Algorithmen einen deutlichen Mehrgewinn darstellt, ist die einfache und effektive Berücksichtigung von Beschränkungen der Stellsignale und der Systemzustände durch den Optimierungsalgorithmus [52]. Somit ist es möglich, während der Optimierung die sich aus den Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems und den menschlichen Wahrnehmungsschwellen ergebenden Beschränkungen einzuhalten. Hinzu kommt, dass zur Minimierung der Kostenfunktion die Berechnung der dargestellten Beschleunigung $\ddot{x}^{(P)}$ innerhalb der Beschränkungen durch beliebige Kombinationen der Horizontalbewegung und der Plattformneigung erfolgen kann. Somit

kann die durch einen Freiheitsgrad dargestellte Beschleunigung durch die eines anderen kompensiert werden. Dies ermöglicht es selbst bei einer Vorgabe von $\ddot{x}_{\text{ref}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ Bewegungen auszuführen. Daraus resultiert gegenüber anderen Ansätzen eine deutlich bessere Ausnutzung des Arbeitsraums und gegenüber anderen MCA eine deutlich bessere Nachbildung der Referenzbeschleunigung. Nachteil des Verfahrens ist eine deutlich höhere Berechnungszeit. Die Struktur der Kostenfunktion, die Beschränkungen, die Länge des Vorhersagehorizonts und die Abtastzeit zwischen den diskreten Berechnungszeitpunkten haben Einfluss auf die Dauer, die zum Lösen des Optimierungsproblems benötigt wird. Ein weiterer Nachteil stellt die Notwendigkeit der Referenz \ddot{x}_{ref} dar. Diese muss für den gesamten Vorhersagehorizont vorliegen, was den Algorithmus nur eingeschränkt für Closed-Loop-Simulationen tauglich macht.

Einer der ersten Ansätze, einen MPC-basierten MCA zu implementieren, wurde 2004 von Dagdelen u. a. vorgestellt [32]. In der Arbeit präsentieren sie einen MCA, der lediglich den longitudinalen Freiheitsgrad des Simulators ausnutzt. Der Beschleunigungsvorgabe wird dabei solange exakt gefolgt, wie die Bauraumgrenzen eingehalten werden können. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Wahrnehmungsschwelle der Simulator bis zum Erreichen der Neutralstellung verzögert. Die Echtzeitfähigkeit wird durch die Beschränkung auf den longitudinalen Freiheitsgrad sichergestellt wodurch gegenüber einer Optimierung aller Freiheitsgrade ein deutlich reduzierte Berechnungskomplexität vorliegt. Seitdem sind weitere Methoden diskutiert worden, um eine Echtzeitimplementierung von MPC zu ermöglichen [8, 21, 4]. Aufgrund der zunehmenden Rechenleistung der Echtzeitsysteme gibt es zum aktuellen Zeitpunkt erste Umsetzungen, die eine Echtzeitoptimierung mehrerer Freiheitsgrade eines Simulators zulassen und einen Prädiktionshorizont von einer Sekunde und mehr aufweisen. So veröffentlichte Biemelt u. a. im Jahr 2018 einen Algorithmus mit einer Zykluszeit von 25 ms und einem Prädiktionshorizont von $N_p = 40$ Schritten [14]. Im gleichen Jahr veröffentlichte Drop u. a. eine Untersuchung zu einem online MPC mit einer Zykluszeit von 10 ms und einem zeitlichem Horizont von $T_p = 10$ s [36]. Nach Angaben der Autoren kann der Horizont bis zu $N_p = 100$ Schritte beinhalten, ohne eine Einschränkung der Echtzeitfähigkeit zu verursachen. Um dies mit der Zykluszeit und der Horizontdauer zu vereinbaren, werden für die Erstellung des Prädiktionshorizonts unterschiedliche Zeitintervalle verwendet. Das Intervall zwischen den ersten 25 Schritten beträgt 10 ms und für die letzten 50 Schritte beträgt es 150 ms. Mit den dazwischenliegenden 25 Schritten erfolgt eine lineare Erhö-

hung des Zeitintervalls. Somit wird eine stärkere Gewichtung der nahe am aktuellen Zeitpunkt liegenden Abweichungen zwischen der Referenzbeschleunigungen und der wahrgenommenen Beschleunigung erreicht. Es ist davon auszugehen, dass durch die fortschreitende Forschung und der steigenden Leistungsfähigkeit der Berechnungssysteme dieser Typ von MCA in naher Zukunft vermehrt in der Fahrsimulation Einsatz findet.

Mit der Durchführung einer Offline-Optimierung bzw. dem Verzicht auf die Echtzeitfähigkeit können die mit den langen Berechnungszeiten verbundenen Einschränkungen vernachlässigt werden. Dieses Vorgehen ist für Closed-Loop-Simulationen zwar nicht relevant, jedoch ergibt sich ein weiterer Vorteil: Da die, für die Berechnung der Steuerfolge benötigte Beschleunigungsreferenz für Open-Loop-Untersuchungen bereits vollständig vorliegt, kann in einem solchen Fall der Prädiktionshorizont über die gesamte Länge der Beschleunigungsreferenz ausgedehnt werden. Somit steht zur Lösung des Optimierungsproblems der höchstmögliche Informationsgehalt zur Verfügung, der eine Berechnung der optimalen Steuerfolge ermöglicht. Da in einem solchen Fall kein gleitender Horizont angewendet wird, gehört ein entsprechender Algorithmus streng genommen nicht mehr zur Klasse der modellprädiktiven Ansätze, sondern zu denen der optimierungsbasierten Ansätze.

Mit diesem Vorgehen ist es möglich, die Wahrnehmung von vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmen zu untersuchen. Hierzu ließen Cleij u. a. eine aufgezeichnete, 320 s lange Fahrt vergleichen, die paarweise durch einen Classical-Washout-basierten Ansatz und durch eine optimierungsbasierte, vorausschauende Trajektorie dargestellt wurde [27]. Jede Fahrt wurde kontinuierlich mittels eines Drehknopfes von den Probanden hinsichtlich wahrgenommenen Bewegungsinkongruenzen (engl. perceived motion incongruence (PMI)) bewertet. Mit dem Drehknopf steuerten die Probanden eine Bewertungsleiste mit 15 Einheiten, die ihnen Rückmeldung über ihre Bewertung gab. Im Mittel bewerteten die 20 teilnehmenden Probanden die durch den vorausschauenden MCA berechnete Fahrt signifikant besser. Mit dem gleichen Verfahren ließen Ellensohn u. a. durch 35 Probanden einen Vergleich mit einem nicht genauer spezifizierten Benchmark MCA durchführen, bei dem der vorausschauende MCA innerhalb der etwa 300 sekundigen Fahrt ebenfalls besser bewertet wurden [37].

2.5 Simulatorkrankheit

Bisher wurde als Schwäche der Fahrsimulation v. a. die nicht exakte Nachbildung der Beschleunigung in den Fokus gerückt. Ein weiteres, häufig in Simulatorstudien auftretendes Problem ist das Ausscheiden von Probanden aufgrund der Simulatorkrankheit. Diese ist eine Variante der Bewegungskrankheiten (Kinetose). Weitere Unterkategorien der Kinetose sind die Seekrankheit, Luftkrankheit, Raumkrankheit und die Landkrankheit. Die auftretenden Symptome sind in allen Fällen ähnlich und können sich durch Blässe, Schwindel, Kopfschmerz, Übelkeit und Erbrechen ausdrücken. Während die aufgeführten Bewegungskrankheiten meist durch vestibuläre Reize ausgelöst werden, kann die primäre Ursache der Simulatorkrankheit auch eine andere sein. Eine in statischen Simulatoren häufig auftretende Krankheit ist die durch visuelle Reize induzierte Bewegungskrankheit (visually induced motion sickness), die gerade durch die Abwesenheit vestibulärer Reize entsteht. [85]. Eine Erklärung für die Krankheit liefert die Sensorkonflikt-Theorie von Reason [115]. Diese führt die Symptome auf Widersprüche in der multisensorischen Verarbeitung zurück. Im Fall der Simulatorkrankheiten ist dies meist ein Konflikt zwischen den vestibulären und visuellen Reizen. Einen maßgeblichen Einfluss auf diese Form der Bewegungskrankheit hat folglich die Abdeckung des Sichtfeldes. Durch eine größere Abdeckung wird zwar ein stärkerer Bewegungseindruck aufgrund des optischen Flusses erzeugt, zeitgleich aber auch die Tendenz zur Simulatorkrankheit verstärkt. Studien belegen, dass mit einer größeren Sichtfeldabdeckung die Tendenz zur visuell induzierten Bewegungskrankheit steigt [89]. Eine Studie von Mourant u. a. zeigt zudem, dass Kurvenfahrten eher zur Simulatorkrankheit führen als Fahrten auf gerader Strecke [100]. Weiteren Einfluss können Zeitunterschiede zwischen der Darstellung der Reize haben [99] und die Dauer einer Simulation [129]. Zur Messung der Simulatorkrankheit wird meist der von Kennedy u. a. erstellte Simulator-Sickness-Questionnaire (SSQ) verwendet. Eine Vier-Punkte-Likert-Skala („gar nicht“ bis „stark zutreffend“) misst dieser 16 Symptome. Anhand einer vorgegebenen Berechnungsvorschrift können daraus drei Faktoren zur Abschätzung des Unwohlseins (Okulomotorik, Desorientierung und Übelkeit) und eine Gesamtpunktzahl entwickelt werden [77]. Eine deutsche Übersetzung des Bogens findet sich im Anhang B.

2.6 Lastwechselfhänomene

Neben dem Verständnis für die menschliche Wahrnehmung ist für die Entwicklung des Simulators die Betrachtung der darzustellenden Schwingungsphänomene des Fahrzeugs erforderlich. Lastwechselfhänomene sind eine Gruppe von Schwingungen, die den längsdynamischen Fahrkomfort eines Fahrzeugs beeinträchtigen. Provozieren lassen sich diese durch eine Fahrpedalbetätigung (Tip-in), eine Fahrpedalrücknahmen (Back-out), Schaltungen oder Kuppeln und bewirken in der Regel Änderungen des übertragenen Moments im Antriebsstrang, die wiederum von den Fahrzeuginsassen wahrnehmbar sind. Über welchen Sinneskanal diese wahrgenommen werden, hängt von der Frequenz des Phänomens ab. Bild 2.8 zeigt die auftretenden Phänomene und unterteilt diese entsprechend ihrer charakteristischen Frequenz in fühlbare und hörbare Schwingungen. Eine detaillierte Beschreibung der Phänomene ist im Handbuch zur Fahrzeugakustik von Zeller [161, S. 107] und in der Arbeit von Hülsmann gegeben [67, S. 5ff]. In diesem Abschnitt soll lediglich auf das Ruckeln eingegangen werden und die Untersuchungen dieser Schwingung.

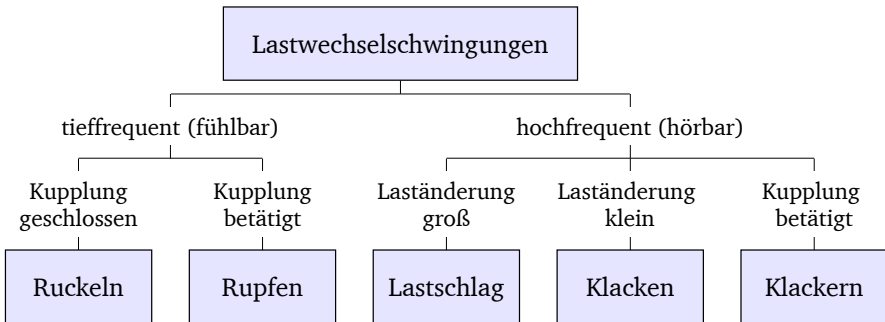


Bild 2.8: Auftretende Schwingungs- und Akustikphänomene beim Lastwechsel, entnommen aus [161, S. 107]

Die Ursache des Ruckelns ist die erste elastische Eigenschwingform des Antriebsstrangs. Kommt es zu einer Anregung, bspw. durch eine sprungartige Anhebung des Motormoments, schwingt das motorseitige Ende des Antriebsstrangs gegen die Räder. Die Form ist eine gedämpfte, abklingende Schwingung mit meistens 3 bis 5 Schwingungsperioden. Nach einer sehr umfangreichen Recherche von

Hülsmann [67, S. 6] liegen die gangabhängigen Frequenzen üblicherweise in einem Bereich von 2 Hz bis 10 Hz. Da die Eigenfrequenz des sitzenden Menschen in Längsrichtung bei etwa 2 Hz bis 5 Hz liegen, beeinträchtigen diese den Fahrkomfort sehr stark [51, 146]. Beeinflussen lassen sich die Schwingungen durch Eingriffe in das Motormoment, die als Komfortfunktionen in den Fahrzeugsteuergeräten hinterlegt sind.

Die gezielte Gestaltung der Komfortfunktionen erfolgt im Rahmen von Fahrversuchen. Um den Einfluss auf das Ruckeln und weiterer fahrbarkeitsrelevanter Kriterien zu untersuchen, wird meist ein Tip-in-Back-out-Manöver, auch Lastwechselmanöver genannt, verwendet [5]. Im oberen Teil von Bild 2.9 ist das in einer Daimler A-Klasse aufgezeichnete Beschleunigungsprofil einer Serie dieser Manöver dargestellt. Zu Beginn des Lastwechselmanövers befindet sich das

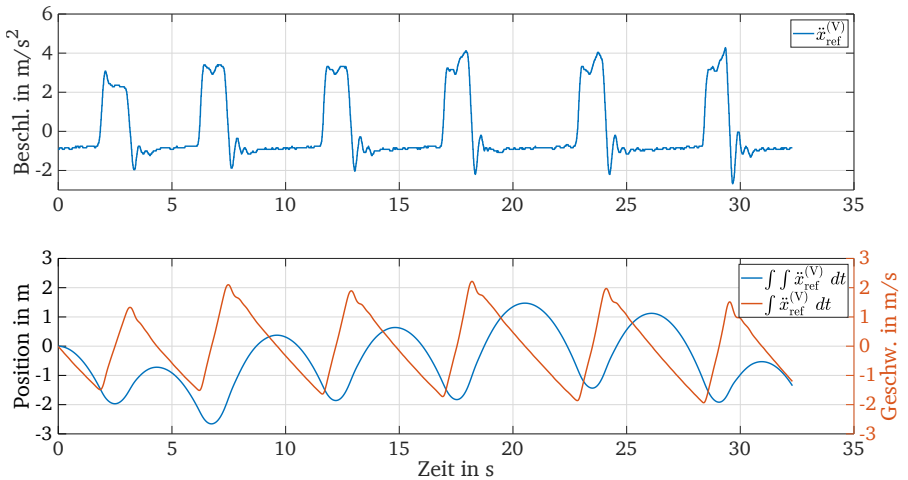


Bild 2.9: Serie von Lastwechselmanövern und die, durch Integration, berechnete Geschwindigkeit und Position

Fahrzeug im Schubbetrieb ohne Betätigung des Fahrpedals. Daraufhin folgt eine möglichst sprunghafte Änderung des Fahrpedalwinkels auf einen konstanten Wert. Infolgedessen baut der Motor ein Moment auf und das Fahrzeug wechselt vom Schub- in den Zugbetrieb. Die Fahrpedalstellung wird in der Regel für 1 s bis 1,2 s gehalten, gefolgt von einer sprunghafte Reduktion des Fahrpedalwinkels in die Ausgangsposition, welche wiederum in einer Schubphase resultiert. In

Bild 2.9 ist zu Beginn dieser leichten Verzögerung das Ruckeln sehr stark ausgeprägt erkennbar. Der untere Teil von Bild 2.9 zeigt die durch zeitliche Integration des diskutierten Beschleunigungsprofils gewonnene Geschwindigkeit und Position. Verdeutlicht werden soll, dass zur unskalierten Darstellung dieses Manövers bereits ein horizontaler Arbeitsraum von etwa 5 m ausreichend ist. In jedem dynamischen Simulator mit entsprechendem Arbeitsraum kann somit die unskalierte Nachbildung dieses Manövers zur Untersuchung fahrbarkeitsrelevanter Kriterien erfolgen und das wohlgemerkt ohne die Verwendung eines MCA.

2.7 Technik der Fahrsimulation

In den Forschungsfeldern Fahr- und Flugsimulation existiert bereits seit mehreren Jahrzehnten eine Vielzahl von Simulatoren, deren technische Umsetzung als Orientierung für die Entwicklung neuer Systeme genutzt werden kann. Einige dieser Systeme werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt. Zuvor erfolgt eine Beschreibung der üblichen Subsysteme und der Klassifizierung von Simulatoren.

2.7.1 Subsysteme und Klassifizierung von Simulatoren

Fahrsimulatoren sind meist, abhängig von ihrer Ausbaustufe, aus den folgenden Subsystemen aufgebaut:

- Das **Bewegungssystem** stellt die anhand des MCA berechneten Positionen zur Erzeugung vestibuläre Reize dar.
- Das **Sichtsystem** erzeugt visuelle Reize durch Darstellung einer virtuellen Realität (VR).
- Das **Geräusch- und Vibrationssystem** umfasst Komponenten zur Nachbildung fahrzeugspezifischer Noise-Vibration-Harshness (NVH)-Phänome.
- Der **Fahrstand** und die **Mensch-Maschine-Schnittstelle** (MMS) umfasst die Fahrgastzelle und die üblicherweise im Fahrzeug vorzufindenden Bedienelemente.
- Die **Datenbasis** stellt die im Hintergrund laufende Software dar, welche aus der Verarbeitung von Eingaben des Probanden und der Versuchsleitung die im Simulator darstellbaren Reize und Informationen berechnet.

Je nach Ausprägung der Subsysteme können Simulatoren klassifiziert werden. Eine häufig vorzufindende Einteilung von Simulatoren erfolgt in statische und dynamische Systeme. Unter den statischen Simulatoren sind solche zu verstehen, die keine vestibulären Reize darstellen und folglich ohne Bewegungssystem auskommen. Solche, die Beschleunigungen simulieren, werden zur Kategorie dynamischer Simulatoren gezählt und tragen nachweislich zu einem höheren Realitätsempfinden bei [117, 108]. Eine weitere Klassifizierungsvariante geht auf Weir und Clark zurück [153], die eine Einteilung in drei Stufen in Abhängigkeit der Beschaffungskosten vorgenommen haben. Die günstige Kategorie, als „Low-Cost“ bezeichnet, kann bereits anhand eines PC mit Simulationssoftware und einer einfach Sichtsimulation in Form eines Monitors umgesetzt werden. Die Gruppe der „Medium-Cost“ zeichnet sich demgegenüber durch eine verbesserte Sichtdarstellung und ein vollständiges Fahrzeugcockpit aus, das alle notwendigen MMS zum Fahren beinhaltet. In beiden Kategorien kann es sich dabei um ein statisches oder dynamisches System handeln, bei letztgenanntem jedoch mit der Einschränkung, dass lediglich rudimentäre vestibuläre Reize dargestellt werden. Die leistungsstärkste Klasse ist die der „High-Cost“-Fahrer-Simulatoren, die ein Sichtsystem mit fast vollständiger 360° Sichtfeldabdeckung bieten und mit einem umfangreichen Bewegungssystem ausgestattet sind, die eine translatorische Bewegungen über 2 m ermöglichen.

2.7.2 Umsetzungen von Bewegungssystemen

Dieser Unterabschnitt bietet einen Überblick über Bewegungssysteme, die sich aktuell in der Entwicklung oder bereits für Forschungsvorhaben im Einsatz befinden. Der Überblick erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern zielt darauf ab die Bandbreite bestehender Systeme kurz darzustellen sowie deren Stärken und Schwächen. Aus der Klassifizierung von Fahrersimulatoren geht hervor, dass vor allem die Kategorie der „High-Cost“-Simulatoren mit einem performanten Bewegungssystem ausgestattet sind, weshalb insbesondere diese im Folgenden betrachtet werden.

Die am häufigsten in dynamischen Simulatoren vorzufindende Bewegungsplattform ist die Stewart-Plattform. Diese zählt zu der Gruppe der Parallelroboter, da die sechs Linearaktoren die Grundplatte mit der neigbaren Plattform parallel verbinden [158, S. 12, S. 407]. Zwei Varianten dieses Systems sind in Teil a) und b) des Bilds 2.10 dargestellt. Die Verwendung als Bewegungssystem bietet sich an,

da der darauf befindliche Plattform Bewegungen in allen sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotative) ermöglicht werden und dies mit ausreichend hoher Dynamik, Steifigkeit und Positioniergenauigkeit für die Anwendung in der Fahrsimulation. Dem gegenüber steht eine Abhängigkeit der Freiheitsgrade voneinander, die dazu führt, dass die Positionsänderung in Richtung eines Freiheitsgrades den Arbeitsraum aller anderen Freiheitsgrade reduziert. Exemplarische Darstellungen zum Arbeitsraum sind in der Arbeit von Sammet gegeben [123, S. 27ff]. Aufgrund dessen wird ein Hexapod häufig nur zur Darstellung von Neigungen verwendet und mit einem Schienensystem kombiniert, das lediglich Horizontalbewegungen ausführt. Der Simulator der Daimler AG (Bild 2.10 a)) und des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS) (Bild 2.10 b)) stellen eine solche Kombination dar. Die hohen Nutzlasten der Hexapods ermöglichen es, in der Kuppel ein vollständiges Fahrzeugchassis und ein Projektionssystem zur Darstellung der VR zu platzieren. Eine Besonderheit des Daimler-Simulators ist die Luftkissenführung des Schienensystems, die eine sehr

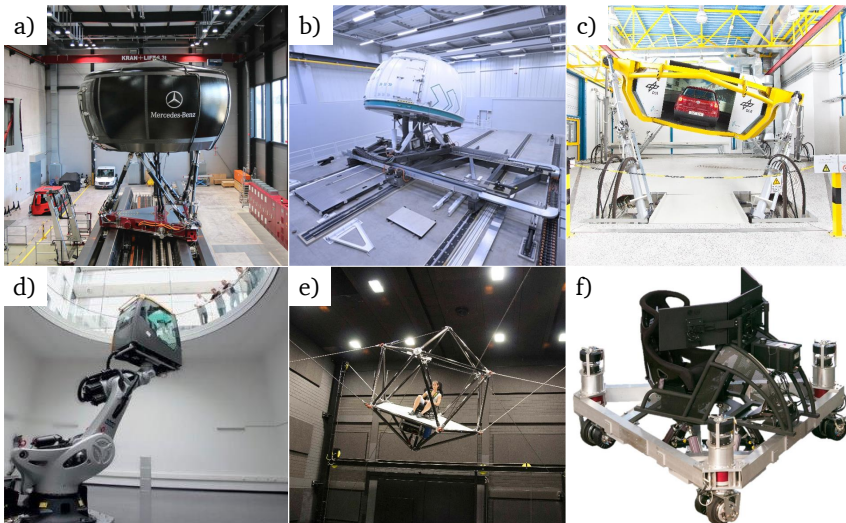


Bild 2.10: Verschiedene dynamische Simulatoren: a) Daimler-Simulator [160] b) FKFS Simulator [50] c) DLR Simulator [49] d) Fraunhofer RODOS [6] e) MPI CableRobot [96] f) FZD MORPHEUS [13, S. 72]

geräusch- und vibrationsarme Horizontalbewegung zulässt [160]. Die Kosten des Daimler-Simulators werden mit rund 40 Millionen Euro angegeben [94].

Die beschriebene Abhängigkeit der Freiheitsgrade der Stewart-Plattform stellt v. a. eine Einschränkung bei der Positionierung des Drehzentrums der Tilt-Coordination dar. Die Darstellung einer Plattformneigung um ein Drehzentrum weit über der Plattform erfordert eine vertikale Auslenkung aller Linearaktoren, wodurch der Bewegungsraum zur Darstellung einer Neigung erschöpft wird. Der in Bild 2.10 c) gezeigte DLR-Simulator begegnet diesem Problem durch die Verlagerung der Anbringungspunkte der Linearaktoren auf die Oberseite der Kuppel. Durch die räumliche Aufspannung der Aktoren ergibt sich jedoch eine erheblich größere Aufstellfläche, wodurch das System ungeeignet für die Kombination mit einem Schienensystem ist.

Weitere Bewegungsplattformen basieren auf Robotern mit serieller Kinematik [158, S. 11], d. h. aus einer Aneinanderreihung von Gelenkarmen. Ein entsprechendes Beispiel stellt der in Bild 2.10 d) dargestellte Simulator Rodos (RObot based Driving and Operation Simulator) des Fraunhofer Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) dar. Als Basis dient häufig ein Industrieroboter mit mehreren Gelenken, der zur Erweiterung des Arbeitsraums mit einem Schienensystem kombiniert werden kann [10]. Serielle Roboter weisen gegenüber parallelen Robotern eine geringere Traglast auf, weshalb meist nur kleine Fahrgastzellen auf der Plattform angebracht sind und als Sichtsystem eine mitgeführte, kleine Projektionsfläche, ein HMD oder eine Projektionsfläche außerhalb der Fahrgastzelle eingesetzt wird.

Losgelöst von der seriellen und parallelen Robotik ist der im Bild 2.10 e) dargestellte CableRobot-Simulator des Max Planck Institute for Biological Cybernetics (MPI). Die Kabine, in Form eines Ikosaeders, ist mit acht Stahlseilen aufgehängt und wird durch angetriebene Winden im Raum bewegt. Der Vorteil ist eine sehr geräusch- und vibrationsarme Betrieb des Bewegungssystems und eine deutliche Erweiterung des Arbeitsraum gegenüber einem Hexapod. Die Nutzlast des System ist mit 500 kg jedoch geringer [96].

Einen weiteren Ansatz verfolgt das Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der TU Darmstadt mit dem mobilen Simulator MORPHEUS (Mobile OmnidiRectional Platform for Highly dynamic and tirEboUnd driving Simulation), dargestellt in Bild 2.10 f). Der Prototyp ist ein Aufbau aus drei Antriebseinheiten, angebracht in den Ecken eines dreieckigen Rahmens. Die Antriebseinheiten bestehen aus angetriebenen Rädern, die um die Vertikalachse (ebenfalls angetrieben) 360° rotiert

werden können. Auf der Rahmenstruktur kann ein Hexapod angebracht werden, der zur Neigung einer oberen Plattform dient. Die Substitution eines kostenintensiven Schienensystem durch radbasierte Antriebseinheiten stellt eine erhebliche Kostenreduktion dar. Gegenüber den bisher vorgestellten Systemen entfällt zudem eine örtliche Bindung, wodurch ein Einsatz an verschiedenen Standorten möglich ist. Die Umsetzung des System ist jedoch mit neuen Herausforderungen verknüpft, bspw. der Entwicklung einer geeigneten Sicherheitsarchitektur und die Behandlung der Vertikaldynamik aufgrund von Bodenunebenheiten [150].

Tabelle 2.2 stellt von den vorgestellten Simulatoren die Grenzen des horizontalen Arbeitsraums, der Horizontalbeschleunigung und des Nickwinkels gegenüber. Den größten horizontalen Stellweg stellt der Daimler-Simulator mit 12,5 m zur Verfügung, insofern der Simulator MORPHEUS von diesem Vergleich ausgeschlossen wird. Die geringsten Stellwege erreichen die Systeme ohne Schienensystem. Die darstellbaren Beschleunigungen liegen zwischen $\pm 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und $\pm 14 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Vor dem Hintergrund, dass die Darstellungsdauer einer Beschleunigung quadratisch in den Weg eingeht, werden die aufgelisteten Simulatoren diese angegebenen maximalen Beschleunigungen jedoch nur sehr kurzzeitig erreichen können. Die Maximalwerte der Nickwinkel orientieren sich überwiegend an der durch die menschliche Wahrnehmung vorgegebenen Grenze von etwa 20° bis 30° .

Tabelle 2.2: Übersicht über die längsdynamischen Darstellungsgrenzen der vorgestellten Simulatoren

Simulator	Translationweg	Horizontalbeschl.	Nickwinkel	Quelle
a) Daimler	12,5 m	$\pm 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 20^\circ$ oder $+24^\circ$	[13, S.35]
b) FKFS	10 m	$\pm 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 18,7^\circ$	[13, S.37]
c) DLR	3 m	$\pm 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 20^\circ$	[49]
d) RODOS	3 m	$\pm 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	kA	[81]
e) CableRobot	5 m	$\pm 14 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 40^\circ$	[96]
f) MORPHEUS	Umgebungsabh.	etwa $\pm 8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	kA	[150]

3 Entwicklung eines längsdynamischen Fahrsimulators

Dieses Kapitel widmet sich der Entwicklung und Analyse des neuartigen Fahrsimulators Driveception. Der Name des Systems ist ein Akronym gebildet aus den Begriffen Driveability (Fahrbarkeit) und Perception (Wahrnehmung) und begründet sich mit dem angestrebten Ziel, diesen zur Untersuchung fahrbarkeitsrelevanter Größen zu nutzen. Als neuartig daran anzusehen ist das auf die Darstellung der Längsdynamik von Fahrzeugen ausgelegte Bewegungssystem. Nach einer Vorstellung der Entwicklungsziele und -methodik werden maßgebliche Anforderungen für den Simulator definiert. Darauf aufbauend folgt eine Beschreibung des Bewegungssystems auf konzeptioneller Ebene, der Auslegung der Aktoren und der realen Umsetzung. Um einen Nachweis über die Leistungsfähigkeit des Simulators zu erbringen, schließt das Kapitel mit einer Analyse des Übertragungsverhalten des Bewegungssystems ab. Die Entwicklung des Simulators erfolgte mit Unterstützung durch studentische Arbeiten. Eine entsprechende Übersicht gibt Anhang C.

3.1 Entwicklungsziel

Die Entwicklung des Fahrsimulators verfolgt übergeordnete Ziele, die in diesem Abschnitt beschrieben werden. Eines dieser Ziele ist die Entwicklung eines Simulators, der gegenüber den vorgestellten „High-Cost“-Varianten günstiger ist, jedoch deren Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Darstellbarkeit von Längsbeschleunigungen beibehält. Dies erfordert einen ausreichend großen Arbeitsraum und innerhalb dessen eine möglichst geringe beschleunigte Masse. Ein weiteres mit dem Bewegungssystem zu erreichendes Ziel ist eine Minimierung von parasitären Beschleunigungsanteilen während der Tilt-Coordination, was eine Anpassung des Drehzentrums an die Sitzposition der Probanden erfordert. Um diesen divergierenden Zielen (geringe Kosten vs. Darstellungsgrenzen) zu begegnen, liegt der Fokus der Entwicklung bewusst auf der Umsetzung der für die Längsdynamikdar-

stellung relevanten Elemente, was einen Verzicht auf die Querdynamikdarstellung bedingt.

Mit dem Simulator sollen verschiedene Manöver, wie bspw. ein Anfahrvorgang oder einen Lastwechsel dargestellt werden. Insbesondere sollen dabei komfortrelevante Ruckelschwingungen, d. h. die ersten Eigenfrequenz des Antriebsstrangs im Bereich von 2 Hz bis 10 Hz dargestellt, und deren Wahrnehmung untersucht werden können.

3.2 Entwicklungsmethodik

Die Systementwicklung orientiert sich an dem in Bild 3.1 gezeigten V-Modell [145]. Dieses besteht aus Prozessbausteinen, die einen Leitfaden zur methodischen Entwicklung von mechatronischen Systemen bilden. Demnach besteht der erste Schritt in der Festlegung von Anforderungen, die das zu entwickelnde Produkt erfüllen muss. Zur Entwicklung des Simulators werden diese aus den im

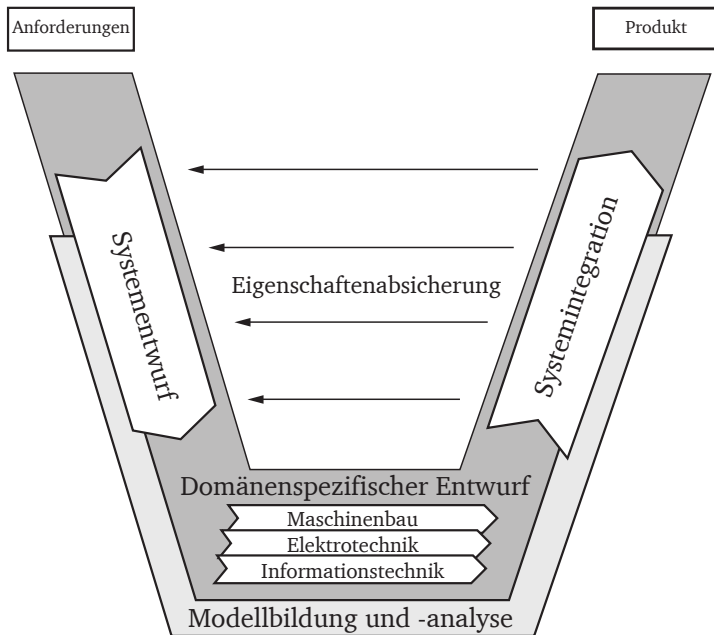


Bild 3.1: V-Modell nach [145]

Stand der Forschung beschriebenen Erkenntnissen zur Wahrnehmung in Fahr-simulatoren abgeleitet. Unter Berücksichtigung der Anforderungen erfolgt der Schritt des Systementwurfs, welcher die Erzeugung von (Bewegungssystem-) Konzepten beinhaltet, die das Spektrum möglicher Lösungen optimalerweise vollständig abdeckt. Parallel zur Ausarbeitung eines Entwurfs auf Basis des aussichtsreichsten Konzepts erfolgt die Entwicklung von dynamischen Systemmodellen zur Auslegung der Aktorik. Der interdisziplinäre Charakter der Mechatronik findet im domänenspezifischen Entwurf durch die simultane Bearbeitung der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik Berücksichtigung. Im vorliegenden Anwendungsfall umfasst dies im Bereich der Elektrotechnik insbesondere die Festlegung der zur Ansteuerung der Aktoren notwendigen elektronischen Komponenten und im Bereich der Informationstechnik die Festlegung von Programmen und Protokollen zur Erzeugung von Signalen für die Subsysteme des Simulators (Bewegungs-, Sicht, Geräusch- und Vibrationssimulation) und zur Kommunikation zwischen diesen. Abschließend erfolgt unter permanenter Absicherung der geforderten Eigenschaften die Integration zu einem Gesamtsystem. Im Rahmen dieser Arbeit beschränkt sich der letztgenannte Schritt auf die Integration der Bewegungs- und Sichtsimation. Der domänenspezifische Entwurf berücksichtigt jedoch alle relevanten Sinneskanäle, sodass der Simulator konzeptionell für die Durchführung differenzierter, multimodaler Studien geeignet ist.

3.3 Anforderungen

Es besteht das Bestreben, einen möglichst hohen Realitätsgrad mit dem Simulator zu erzielen. Um dies zu erreichen, bedarf es, bezogen auf einen dynamischen Fahr-simulator der aktives Fahren erlaubt, nach Kuhl u. a. einer qualitativ hochwertigen Umsetzung der folgenden drei Faktoren [84]:

- Die Steuerungs- und Reizschnittstellen, mit denen der Fahrer das Fahrzeug steuert und das Fahrzeugverhalten erlebt.
- Das Fahrverhalten des simulierten Fahrzeugs infolge der Fahreingaben.
- Die externe, virtuelle Realität, in der das Fahrzeug bewegt wird und mit der der Fahrer interagiert.

Ausgehend von diesen übergeordneten Faktoren, den im vorangegangenen Kapitel erworbenen Erkenntnissen und technischen Randbedingungen erfolgt die Festlegung der in Tabelle 3.1 gelisteten Festforderungen (F), Mindestforderungen (M) und Wünsche (W). Es sollen die Bewegungsreize dargestellt werden, die in einem realen Fahrzeug während längsdynamischer Manöver auftreten. Dem Bewegungssystem ist dabei die höchste Priorität zuzuordnen. Die Entwicklung strebt ein System an, das für die Darstellung von Beschleunigungen bis zu $\pm 9,81 \frac{m}{s^2}$ geeignet ist. Grundsätzlich soll dies durch eine Kombination von Linear- und Rotationsbewegungen erfolgen. Die Diskussion der Tilt-Coordination zeigte jedoch, dass Neigungen nicht beliebig mit Linearbewegungen kombiniert werden können aufgrund der dem virtuellen Gravitationsvektor entgegengesetzten Wirkrichtung einer Komponente der Horizontalbewegung (vgl. Bild 2.4). Aus diesem Grund soll die horizontale Linearachse so ausgelegt werden, dass die Beschleunigung von $\pm 9,81 \frac{m}{s^2}$ für 0,5 s durch diese alleine dargestellt werden kann. Resultierend aus dieser Forderung muss die Linearachse eine Geschwindigkeit von etwa $\pm 5 \frac{m}{s}$ erreichen können. Die bewegte Masse soll, ohne Proband, nicht mehr als 500 kg wiegen, um unter Beibehaltung der darstellbaren Beschleunigungen die Leistung und damit die Kosten für die Antriebsachsen, insbesondere der Achse zur Darstellung der Horizontalbewegung, in Grenzen zu halten. Die Baulänge von 15 m soll überwiegend zur Horizontalbewegung der Linearachse zur Verfügung stehen und Raum für eine mechanische Rückfallebene bieten. Um eine Anpassung der Simulatorlänge an die verfügbare Baulänge zu ermöglichen, soll die Linearachse aus einzelnen Segmenten bestehen. Wie die Diskussion der Tilt-Coordination zeigte, sollte das Drehzentrum zum Aufbau der Neigung in der Nähe bzw. oberhalb des Fahrerkopfes liegen. Als Referenz zur Festlegung der Höhe dient die Fahrerkopfposition in einer Mercedes-Benz A-Klasse (W 176) bezogen auf den Fußboden des Fahrzeugs. Der gemessene Abstand liegt abhängig von der Sitzeinstellung und der Fahrergröße bei etwa 1 m. Um den Einfluss des Drehzentrums auf die Simulationsgüte untersuchen zu können, soll die Lage in der Höhe variable einstellbar sein. Die Minimalanforderungen für die Rotationsbewegungen ergeben sich aus den in Unterabschnitt 2.1.2 diskutierten Schwellenwerten. Die darstellbare Neigung soll folglich $\pm 25^\circ$ betragen und die Drehrate von $6 \frac{^\circ}{s}$ sowie die Drehbeschleunigung von $11 \frac{^\circ}{s^2}$ sollen mindestens erreicht werden.

Die Forderung nach einer geringen bewegten Masse beeinflusst neben der Gestaltung des Bewegungssystems v. a. die des Fahrstands. Sie erlaubt nicht die Verwendung eines vollständigen Fahrzeugmockups. Um dennoch eine gewohn-

Tabelle 3.1: Anforderungen

Bezeichnung	Art	Wert
Vestibulärer Reizung	F	Vorhanden
Optische Reizung	F	Vorhanden
Akustische Reizung	F	Vorhanden
Vibrotaktile Reizung	F	Vorhanden
Darstellbare Beschleunigung	W	$\pm 9,81 \frac{m}{s^2}$
Darstellung der Beschleunigung	F	Durch translatorische Bewegung und Tilt-Coordination
Transl. Geschwindigkeit	M	$\pm 5 \frac{m}{s}$
Bewegte Masse	F	Max. 500 kg
Bauraum	F	15 m x 2,3 m x 4 m
Mechanische Rückfallebene	F	Vorhanden
Ausbau des Fahrwegs	F	Möglich
Drehpunktlage für Tilt-Coordination	F	1 m, anpassbar an die Kopfhöhe des Fahrers
Verstellung der Drehpunktlage für Tilt-Coordination	W	variabel während des Versuchs über Anpassung der Kinematik
Darstellbare Neigung	F	$\pm 25^\circ$
Darstellbare Rotationsrate und Drehbeschleunigung	M	$6 \frac{^\circ}{s}$ und $11 \frac{^\circ}{s^2}$
Bedien-/Kontaktelemente	F	Reale Fahrzeugkomponenten
Fahrstandlänge	M	1,2 m
Interieur und Bedienelemente	F	An verschiedene Fahrzeugtypen und -Klassen anpassbar
Einhausung	F	vorhanden
Sichtsystem	W	Durch HMD
Geräuschsystem	M	20 Hz bis 20.000 Hz
Vibrationssystem	M	50 Hz bis 1.000 Hz
Isolierte Betrachtung einzelner Sinneskanäle	F	Möglich

te Haptik an den Schnittstellen zu erzielen, sollen sämtliche Bedien- und Kontaktelemente aus einem realen Fahrzeug ausgebaut und im Fahrstand verwendet werden. Als erste Konfiguration dienen hierzu Komponenten aus der bereits zur Ermittlung der Kopfhöhe verwendeten Mercedes-Benz A-Klasse. Um ein flexibles Austauschen der Komponenten zu ermöglichen, das es erlaubt das Interieur weitere Fahrzeugtypen nachzubilden, soll die Anbringung auf einer Montageplattform erfolgen. Aus einer Vermessung der A-Klasse, von der Hinterkante des Fahrersitzes bis zu den Pedalen, ergibt sich überschlägig, dass eine Länge von mindestens 1,2 m für den Fahrstand vorgesehen werden muss, um alle Komponenten wie im Fahrzeug anzubringen. Als weitere Komponente des Fahrstands soll eine Umhauung den Probanden von Windzügen und Geräuschen infolge der Simulatorbewegungen isolieren.

Als Sichtsystem soll ein kompaktes HMD zum Einsatz kommen, das gegenüber Projektionssystemen deutlich weniger Bauraum erfordert und die Möglichkeit bietet, die gewohnte Optik eines Fahrzeuginnenraums virtuell darstellen. Wünschenswert ist, entsprechend der Ausführungen von Abschnitt 2.1.1, dass dieses eine Auflösung von einer Bogenminute aufweist, um die Erkennbarkeit von Anzeigen zu garantieren und, zur bestmöglichen visuellen Einschätzung der Geschwindigkeit, das menschliche Sichtfeld zu 180° in der Horizontalen abdeckt. Zur Darstellung von Geräuschen sollen Kopfhörer dienen, die den hörbaren Frequenzbereich von 20 Hz bis 20.000 Hz abdecken. Das System zur Darstellung von Vibrationen soll Frequenzen von mindestens 50 Hz bis 1000 Hz an den Kontaktelementen Sitz, Pedale und Lenkrad darstellen können.

Der Simulator soll konzeptionell so ausgelegt werden, dass die flankierenden Reize (Optik, Akustik, Vibration) nicht nur dargestellt, sondern auch gezielt eingespielt oder unterdrückt werden können, um im Rahmen multimodaler Untersuchungen den Einfluss einzelner Reize isoliert betrachten zu können.

3.4 Beschreibung des Fahrsimulators

Dieser Abschnitt beschreibt die technischen Details des Fahrzeugsimulators. Ausgehend von einer konzeptionellen Betrachtung des Bewegungssystems folgt eine detaillierte technische Beschreibung aller Komponenten.

3.4.1 Konzept des Bewegungssystems

Eine für die Konzeptauswahl maßgebende Anforderung an das Bewegungssystem ist die Möglichkeit, Neigungen um den Kopf des Probanden zu ermöglichen und das mit einer leichten und kompakten Bauform. Das letztlich ausgewählte Bewegungssystem, welches potentiell geeignet ist, die gesetzten Anforderungen zu erfüllen, setzt sich aus vier Aktoren zusammen. Drei dieser Aktoren sind unterhalb einer Plattform angebracht zur Erzeugung einer Neigung und einer vertikalen Auslenkung. Diese Aktoren befinden sich auf einem Schlitten, dessen Bewegung in horizontaler Richtung durch einen vierten Aktor erfolgt. Die Ausrichtung der Aktoren soll anhand des Bilds 3.2 genauer erläutert werden. Darin zu sehen ist eine seitliche Ansicht des Simulators überlagert von den notwendigen Freiheitsgraden zur Darstellung der geforderten Bewegungsform.

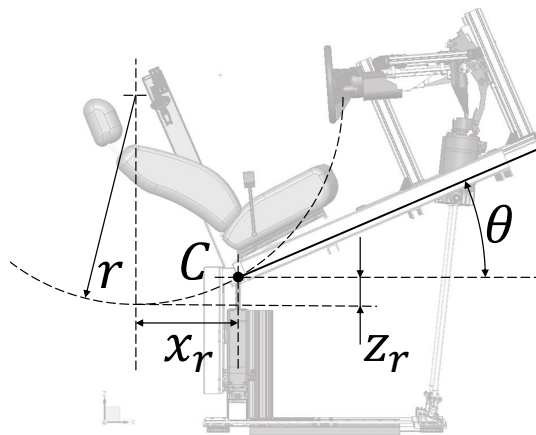


Bild 3.2: Grundkonzept des dynamischen Simulators

Aus der Forderung, Neigungen um den Kopf eines Probanden zu ermöglichen, ergibt sich, dass die Plattform tangential auf einer Kreisbahn rotiert werden muss. Positioniert man, ausgehend von einer horizontal ausgerichteten Plattform, den Fahrerkopf oberhalb einer der drei Aktoren, so muss dieser lediglich eine Vertikalbewegung ausführen. Der obere Angriffspunkt dieses Aktors ist im Bild 3.2 mit dem Punkt C markiert und die entsprechende Vertikalbewegung mit z_r gekennzeichnet. Der Aktor befindet sich am hintere Ende der Plattform, sodass hinter diesem Aktor eine Führung angebracht werden kann, die zur Abstützung von

Kräften dient, die nicht in vertikaler Richtung wirken. Zudem ergibt sich der Vorteil, dass der Fahrersitz sich im hinteren Teil der Plattform befindet, sodass der vordere Teil genügend Bauraum für den Fahrstand bietet. Um die Plattform auf der Kreisbahn mit dem Radius r zu rotieren, ist letztlich eine Neigung mit dem Winkel θ und eine Verschiebung der gesamten Plattform in horizontaler Richtung x_r erforderlich. Die Einstellung des Winkels θ erfolgt durch die beiden vorderen Aktoren bzw. durch deren vertikale Positionsverschiebung relativ zum Punkt C .

Zur Sicherstellung, dass der Kopf des Probanden oberhalb des Punkts C positioniert ist, wird unter dem Sitz eine Sitzschiene angebracht, die eine horizontale Verschiebung des Sitzes erlaubt. Um die Erreichbarkeit der Bedienelemente für Menschen unterschiedlicher Körpergröße zu ermöglichen, wird die vordere Montageplattform ebenfalls horizontal verstellbar umgesetzt, sodass eine Anordnung des Lenkrads und der Pedalen relativ zur Sitzposition wie im Fahrzeug erfolgen kann.

3.4.2 Auslegung des Bewegungssystems

Die Auslegung des Bewegungssystems erfordert eine Dimensionierung und Positionierung der Aktoren. Für diesen Schritt wird ein Modell der inversen Kinematik und der Dynamik erzeugt. Letzteres dient zur Abschätzung der Stellkräfte, während ein Modell der inversen Kinematik zur Festlegung der Aktorpositionen und der -stellwege erforderlich ist. Zudem wird diese benötigt, um im späteren Betrieb die in Plattformkoordinaten (θ, x) vorliegenden Ausgangssignale des MCA in die Aktorkoordinaten umzurechnen. Bild 3.3 zeigt eine Strichskizze des Bewegungssystem mit allen festzulegenden Maßen. Die Darstellung des Winkels θ und des Radius r erfolgt durch eine Änderung der Aktorlängen l_{BC} und l_{GH} sowie einer Simulatorverschiebung l_{OA} durch Aktor 1. Die Größen sollen nachfolgend hergeleitet werden. Die Simulatorverschiebung ergibt sich zu

$$l_{OA} = r \cdot \sin \theta . \quad (3.1)$$

Die Längenänderung des vertikal ausgerichteten, hinteren Aktors 2, die sich aus der Position des unteren Angriffpunktes B $(x_{B,S}, z_{B,S})$ und des oberen Angriffpunktes C $(x_{C,S}, z_{C,S})$ ergibt, berechnet sich zu:

$$l_{BC} = z_{C,S} - l_{AB} . \quad (3.2)$$

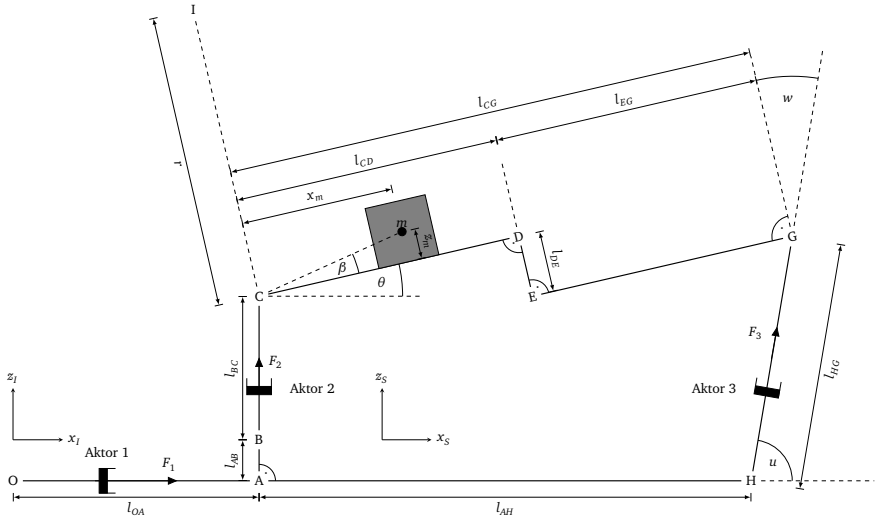


Bild 3.3: Skizze des Bewegungssystems mit Punktmasse

Während l_{AB} eine zu dimensionierende Konstante ist, berechnet sich $z_{C,S}$ in Abhängigkeit des Radius r und des Neigungswinkels θ zu

$$z_{C,S}(r, \theta) = l_{AB} + l_{BC,0} + r \cdot (1 - \cos \theta) . \quad (3.3)$$

Hierbei definiert l_{AB} die vertikale Anbringung des Aktors 2 und $l_{BC,0}$ dessen festzulegende, initiale Länge. Die beiden Werte definieren die Einstiegshöhe der neigbaren Plattform und beeinflussen maßgeblich die Länge von Aktor 3 und die Darstellungsgrenzen hinsichtlich negativer Neigungswinkel. Die Länge des vorderen Aktors ergibt sich aus dem Betrag des Vektors zwischen den Punkten H ($x_{H,S}, z_{H,S}$) und G ($x_{G,S}, z_{G,S}$) zu:

$$l_{HG} = \sqrt{(x_G - l_{AH})^2 + z_G^2} . \quad (3.4)$$

Die Lage des Punktes G berechnet sich wiederum aus der Geometrie der neigbaren Plattform und den Variablen r und θ :

$$x_G(\theta) = l_{CD} \cdot \cos \theta + l_{DE} \cdot \sin \theta + l_{EG} \cdot \cos \theta , \quad (3.5)$$

$$z_G(r, \theta) = z_C + l_{CD} \cdot \sin \theta - l_{DE} \cdot \cos \theta + l_{EG} \cdot \sin \theta . \quad (3.6)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3.3) in Gleichung (3.2) und von Gleichung (3.5) und (3.6) in Gleichung (3.4) sind die Informationen zur Umrechnung der Plattformkoordinaten in die Aktorkoordinaten vollständig gegeben. Für die Berechnung der Dynamik müssen zudem die Winkel u und w berechnet werden. Für den Winkel u , der die Orientierung des Aktors 3 angibt, gilt

$$u = \arctan\left(\frac{z_G}{x_G - l_{AH}}\right). \quad (3.7)$$

Der Winkel w ist erforderlich zur Berechnung der senkrecht auf die neigbare Plattform wirkenden Komponente von Aktor 3. Dementsprechend ist diese abhängig von der Orientierung der neigbaren Plattform θ und des vorderen Aktors u :

$$w = \theta + \frac{\pi}{2} - u \quad (3.8)$$

Für die Abschätzung der Stellkräfte wird ein Dynamikmodell entwickelt, das die maßgeblich beitragenden Kräfte beinhaltet. Dazu zählen die Kraftanteile aufgrund von Gravitation, einer translatorischen Beschleunigung des Schlittens und einer Hubbewegung der oberen Plattform. Aus diesen Anteilen ergeben sich die am Punkt C und am Punkt G angreifenden Aktorkräfte F_2 und F_3 zu:

$$\begin{aligned} F_2 &= mg \cdot \left(1 - \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \\ &+ m\ddot{x}_m \cdot \frac{l_m \sin(\beta + \theta)}{l_{CG} \cos w} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \\ &+ m\ddot{z}_m \cdot \left(1 - \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} F_3 &= mg \cdot \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \\ &- m\ddot{x}_m \cdot \frac{l_m \sin(\beta + \theta)}{l_{CG} \cos w} \\ &+ m\ddot{z}_m \cdot \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Eine Beschreibung der Herleitung von Gleichung (3.9) und (3.10) ist in Anhang A gegeben. Unter Berücksichtigung der Anforderungen gilt es mithilfe einer numerischen Simulation des Dynamikmodells, die Aktoren zu dimensionieren und positionieren. Ausgangspunkt für diese Entwicklungsschritte ist der Platzbedarf auf

der neigbaren Plattform l_{CD} von mindestens 1,2 m. Rotiert man eine Plattform dieser Länge mit -25° um den hintersten Punkt, muss der Drehpunkt in einer Höhe von

$$l_{AB} + l_{BC,0} \stackrel{!}{\geq} |1,2 \text{ m} \cdot \sin(-25^\circ)| = 0,51 \text{ m} \quad (3.11)$$

angebracht sein, um eine Kollision der vorderen Plattformkante mit dem Boden zu vermeiden. Aus dieser Anforderung und drei weiteren Zielvorgaben ergeben sich die in Tabelle 3.2 aufgelisteten Konflikte, zwischen denen es zu vermitteln gilt. Anhand von Simulationen erfolgt eine iterative Anpassung der Geometrien und

Tabelle 3.2: Zielkonflikte der Bewegungssystemauslegung

Ziel	Grund	Konflikt
Bauraumlänge von ca. 1,2 m für Fahrstand (l_{CD})	Anbringung von Bedienelementen entsprechend Fahrzeug	Kollision der neigbaren Plattform (Vorderkante) mit Schienen bei starker negativer Neigung
Niedrig liegender Schwerpunkt der oberen Plattform	Geringe Schwingungsfähigkeit des Systems; hoch liegende Plattform erschwert einsteigen	Kollision der neigbaren Plattform (Vorderkante) mit Schienen bei starker negativer Neigung
Möglichst geringe Schlittenlänge (l_{AH})	Schlittenlänge steht nicht als Stellweg zur Verfügung	Vertikale Ausrichtung der vorderen Aktoren gewünscht
Geringe Spindellänge bzw. geringe Stellweg der vorderen Aktoren	Oberes Ende der Spindel ragt in horizontaler Richtung über den Aufbau hinaus oder hinein	Verkürzung nur durch Ver-ringerung von l_{CG} und l_{AH} möglich, dadurch jedoch erhöhte Aktorstellkräfte

Aktorstellkräfte. Dazu wird eine Masse von $m = 400 \text{ kg}$ mit den Schwerpunktskoordinaten $x_m = 0,6 \text{ m}$ und $z_m = 0,3 \text{ m}$ angenommen. Als Bewegungsprofil werden horizontale Beschleunigung von $\pm 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ kombiniert mit einer Rotationsbewegung der neigbaren Plattform simuliert. Die Rotationsbewegung wird durch einen fünfsekündigen sigmoidalen Verlauf zwischen -25° und 25° dargestellt. Im Schnitt liegt die Drehrate bei $5 \frac{^\circ}{\text{s}}$, folglich ist diese zwischenzeitlich deutlich höher, sodass insgesamt eine leichte Überdimensionierung im Bezug auf die Aktorstellkräfte erfolgt. Tabelle 3.3 listet die geometrischen Ergebnisse des Auslegungsprozesses auf. Die Schlittenlänge beträgt aufgrund des Abstands der unteren Aktoranbringungen l_{AH} in etwa 1 m. Die als Ausgangspunkt dienende

hintere Anbringungshöhe $l_{AB} + l_{BC,0}$ der Plattform beträgt 0,52 m und ist somit nur geringfügig größer als die geforderten 0,51 m. Da die Plattformlänge l_{CD} eine Länge von 1,39 m aufweist, können Winkel von -25° ohne Anhebung des hinteren Aktors nicht dargestellt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Geometrien auf eine Drehpunktlage von etwa 1 m optimiert sind. Tabelle 3.4 enthält die Dynamikwerte. Am hinteren Angriffspunkt C beträgt die erforderliche Kraft maximal 4673 N. Am vorderen Angriffspunkt G ist eine Kraft von etwa 3800 N notwendig, die sich auf zwei Aktoren aufteilt. Mit dieser Festlegung der Geometrien und der Auswahl von Aktoren erfolgt eine Auskonstruktion des Systementwurfs in CAD.

Tabelle 3.3: Gewählte Parameter der inversen Kinematik

Größe	x_B	z_B	x_C	l_{AH}	l_{AB}	$l_{BC,0}$	l_{CD}	l_{DE}	l_{EG}	l_{CG}
Wert in m	0	0	0	0,93	0,05	0,47	1,39	0,05	-0,28	1,11

Tabelle 3.4: Resultate der Dynamiksimulation mit einer Masse $m = 400$ kg, einem Radius von $r = 1$ m und einer Schwerpunktlage von $x_m = 0,6$ m und $z_m = 0,3$ m

Aktor	Weg in m	Beschl. in $\frac{m}{s^2}$	Kraft in N	Geschw. in $\frac{m}{s}$	Leistung in W
3		-9,81	3758		1700
3	0,93	0	2504	0,47	341
2		9,81	4673		1040
2	0,093	0	2405	0,083	180

3.4.3 Technische Details des Bewegungssystems

Die Umsetzung des Bewegungssystems ist in Bild 3.4 dargestellt. Die Basis für den linear beweglichen Teil bilden etwa 1,2 m lange Stahlplatten, die mit Schwerlastankern im Boden fixiert sind. Zur Nivellierung befinden sich zwischen den Stahlplatten und dem Boden elastische Kunststoffmatten. Die Führung des darauf angebrachten Schlittens erfolgt durch Profilschienen und Kugelumlaufeinheiten, die auf den Stahlplatten bzw. an der Unterseite des Schlittens befestigt sind. Die Aktuierung übernimmt ein Synchron-Direktantrieb, der einen spielfreien und

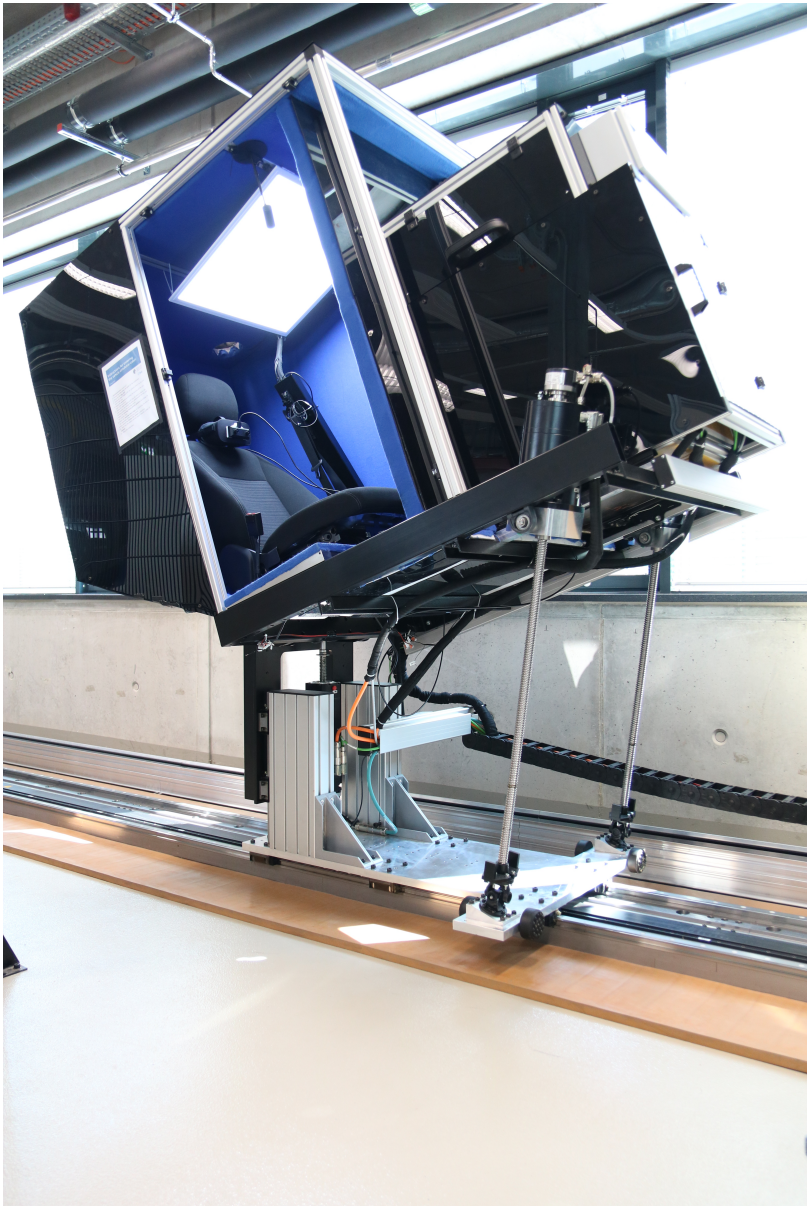


Bild 3.4: Längsdynamischer Fahrsimulator Driveception im geneigten Zustand

vibrationarmen Betrieb ermöglicht. Der auf den Schienen befahrbare Bereich beträgt abzüglich der Schlittenlänge etwas mehr als 10 m. Die Kugelumlaufeinheiten lassen eine maximale Geschwindigkeit von $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zu. Entsprechend der vorherigen konzeptionellen Betrachtung erfolgt die Neigung der oberen Plattform durch drei Synchronmotoren. Um im stromfreien Zustand eine Positionsverschiebung zu unterbinden, sind diese mit Bremsen ausgestattet. Der hintere Aktor führt lediglich eine Bewegung in vertikaler Richtung aus und ist auf einem Drehgelenk angebracht. Die vordere, zweifach ausgeführte Achse besteht aus zwei Hohlwellenmotoren, welche auf Spindeln parallel verfahren. Um die auf die Spindel wirkenden Querkkräfte gering zu halten, sind diese auf Kreuzgelenken gelagert. Aufgrund der unterseitigen Anbringung der drei Hubaktoren können diese, neben den axial wirkenden Kräften, keine weiteren aufnehmen. Die Abstützung der nicht axialen Kräfte erfolgt über eine versteifte Aluminiumplatte am hinteren Ende des Simulators. Zur Aufnahme der wirkenden Kräfte ist diese durch zwei Stehlager, die konzentrisch zum Gelenkkopf des hinteren Aktors angeordnet sind, mit der oberen Plattform verbunden. Die Weiterleitung der Kräfte erfolgt über zwei vertikal verlaufende Profilschienen, die auf Aluminiumprofilen fixiert sind. Zur Positionsregelung der Aktoren dienen vier Servoregler. Eine Übersicht über die Spezifikation der genannten Aktoren liefert Tabelle 3.5. Anzumerken ist, dass die vorderen Hubaktoren, im Gegensatz zu den anderen Achsen, mit Absolutwertgebern ausgestattet sind. Dies vereinfacht den Start der Anlage deutlich, da eine Referenzierung beider Achsen, die parallel stattfinden müsste, entfällt.

Tabelle 3.5: Aktorspezifikationen

	Linearbewegung	Hinterer Hub	Vorderer Hub
Nennkraft	3000 N	6880 N	1660 N
Nenngeschwindigkeit	$5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$1,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Maximalkraft	4000 N	16000 N	2848 N
Maximaler Stellweg	10 m	0,15 m	1 m
Sensorprotokoll	SinCos (relativ)	Resolver (relativ)	SSI/SinCos (absolut)

3.4.4 Fahrgastzelle und Bedienelemente

Um den Probanden während der Versuchsdurchführung von störenden Geräuschen zu isolieren, ist eine Einhausung auf der oberen Plattform angebracht.

Die Wände bestehen aus 3 mm dicken Acrylglasplatten, die auf einem Rahmen aus Aluminiumprofilen fixiert sind. Die Innenseite der Wände ist mit 50 mm dicken Akustikschaumstoffplatten ausgekleidet. Dabei handelt es sich um einen offenporigen Schaumstoff aus Melaminharz, welcher sehr effektive Schallabsorptionsfähigkeiten nach ISO 10534-2 besitzt [109]. Um zu gewährleisten, dass ein Proband im Notfall zügig und ohne Hilfe von außen die Fahrgastzelle schnell verlassen kann, ist die Tür durch Magnete am Rahmen fixiert. Die gesamte Innenseite der Fahrgastzelle ist mit einem blauen Bühnenmolton überzogen. Das Gewebe ist beidseitig angeraut, wodurch es Licht und schallabsorbierende Eigenschaften aufweist. Die Farbe und der Stoff sind für den Einsatz einer Chroma Keying-Technik [134] geeignet. Eine Analyse der geräuschabsorbierenden Eigenschaften der Fahrgastzelle ist in der Veröffentlichung [39] beschrieben.

Entsprechend der in Abschnitt 3.3 definierten Anforderungen sind die Bedienelemente zur Steuerung des Fahrzeugs, der Sitz, der Anschnallgurt und ein Teil des Fahrerfußraumteppichs aus einer Mercedes-Benz A-Klasse W176 entnommen (siehe Bild 3.5). Der Ausbau des Lenkrads umfasst die Entnahme der vollständigen Lenksäule bis zum obersten Kreuzgelenk, die Lenksäulenverkleidung und das Lenkrad ohne das enthaltene Airbag-Modul. Um keine Irritationen durch



Bild 3.5: Aus A-Klasse entnommene Komponenten.

die Anordnung der Bedienelemente zu verursachen, erfolgt die Positionierung der Komponenten im Simulator entsprechend der Positionen im realen Fahrzeug. Dabei ist ein wichtiger Aspekt die exakte Ausrichtung der Sitzschiene. Diese ist im Fahrzeug mit einem Winkel von 4° gegenüber dem Fahrerfußraum geneigt. Ausgehend von der Sitzschienenposition erfolgt die Positionierung des Fahrpedals, des Bremspedals und des Lenkrads. Zum flexiblen Austausch und Positionieren dieser Bedienelemente dient als Montageplattform ein Rahmen aus Aluminiumprofilen. Dieses ist ähnlich wie der Sitz an der Unterseite mit einem Verstell-Mechanismus ausgestattet, welcher durch einen Hebel entriegelt werden kann, der sich neben dem Fahrersitz befindet. Somit kann jeder Proband selbstständig die Position der Bedienelemente einstellen. Die Einstellungsmöglichkeit der Sitzschiene dient nur zur Ausrichtung des Fahrerkopfes durch den Versuchsleiter.

Um am Lenkrad und am Bremspedal die typischen Betätigungswiderstände nachzubilden, mussten Modifizierungen vorgenommen werden. Die Beschränkung auf Untersuchungen der Längsdynamik erfordert im Falle des Lenkrads jedoch nicht die voll umfängliche Nachbildung der Betätigungskräfte. Aus diesem Grund dient lediglich ein am Ende der Lenksäule angebrachtes Torsions-Feder-Dämpfer-Element dazu, das Lenkrad bei Auslenkung in die Ausgangsposition zurückzuführen. Das Betätigungsgefühl des Bremspedals bildet das im linken Teil von Bild 3.6 dargestellte Aktormodul nach. Dieses besteht aus einem 400 W-Synchronmotor und einem Getriebe, welches am Getriebeausgang ein Nennmoment von 145 Nm stellt. Somit ist es möglich, verschiedene Bremspedale anzubringen und unterschiedliche Kraft-Weg-Charakteristiken darzustellen. Für die Untersuchung verschiedener Fahrpedale ist eine Aufnahme konstruiert worden, welche einen Austausch ermöglicht. Der rechte Teil von Bild 3.6 zeigt die entwickelte Aufnahme.

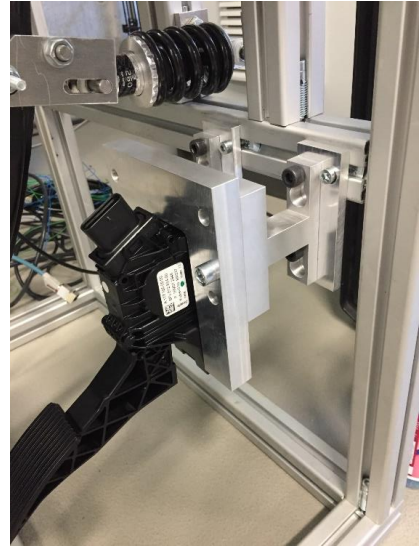
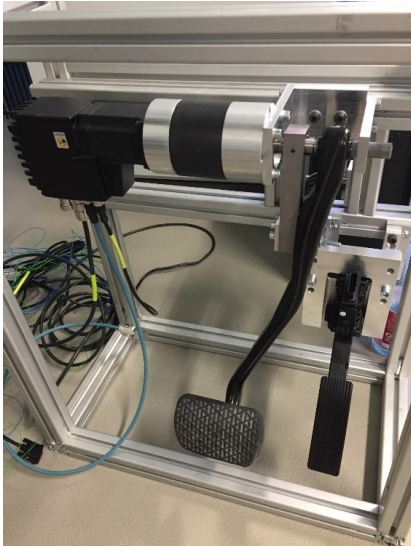


Bild 3.6: Bremspedalmodul und Fahrpedal (links) und Detailansicht der Fahrpedalaufnahme (rechts).

3.4.5 Sichtsystem

Als Sichtsystem wird das HMD Oculus Rift CV1 verwendet [148]. Die Spezifikationen der Datenbrille sind in Tabelle 3.6 aufgeführt. Die Position der Brille im Raum wird durch interne Sensorik erfasst und kann durch die Verwendung von bis zu drei externen optischen Sensoren verbessert werden. Eine Verbesserung durch die Verwendung eines zweiten Sensors konnte während der Verwendung jedoch nicht festgestellt werden und dient lediglich zur Vermeidung der Sichtfeldabdeckung, bspw. durch die Hand des Probanden.

Die in der Brille dargestellte virtuelle Umgebung wird mit der Software Unity entwickelt. Die Umgebung beinhaltet mehrere 3D-Objekte, darunter ein kommerziell erworbenes Modell einer Mercedes-Benz A-Klasse W176 und eine geradeaus führende Straße, die als Endlosschleife implementiert ist. Die Straßenumgebung ist sehr schlicht gehalten, um den Probanden während der Fahrt nicht abzulenken. Überdies ist gemäß einer Studie mit einem HMD die verzögerungs- und ruckel-

Tabelle 3.6: Spezifikationen der Oculus Rift [148]

Spezifikation	Wert
Auflösung	2.160 x 1.200 (1.080 x 1200 pro Auge) Pixel
Bildfrequenz	90 Hz
Masse	470g (ohne Kabel)
Sichtfeld horizontal	etwa 100°
Augenabstand	Einstellbar (58 bis 72 mm)
Tracking	Raumtracking via externer Infrarotkamera (bis zu vier), integrierte inertielle Messeinheit

freie Darstellung der Szene wichtiger für das Präsenzepfinden als der visuelle Inhalt der virtuellen Umgebung [88].

Das 3D-Modell des Fahrzeugs wurde auf die sichtbaren Komponenten reduziert, um eine ressourcenschonende Berechnung zu ermöglichen. Überdies erfolgte die Modifizierung einiger statischer MMS, sodass diese zur Interaktion genutzt werden können. Tabelle 3.7 gibt einen Überblick über die Modifikationen.

Tabelle 3.7: Modifikationen am 3D-Fahrzeugmodell

Komponente	Änderung
Tachometer und Drehzahlmesser	Aufspaltung in Scheibe und Zeiger, um darüber Geschwindigkeiten und Drehzahlen anzuzeigen.
Digitaldisplay im Kombinationsinstrument	Implementierung von Textfeldern (textmeshes), um im unteren Teil die Geschwindigkeit und den Gang sowie im oberen Teil die Uhrzeit und Temperatur anzuzeigen.
Navigationsgerät	Implementierung eines Textfeldes, um Anweisung und Informationen für den Probanden anzuzeigen.
Head-Up-Display	Implementierung eines Feldes zur Darstellung verschiedener Graphen, bspw. zur Vorgabe von Fahrpedal- und Bremspedalpositionen.
Rück- und Seitenspiegel	Abspaltung vom Gesamtmodell, um eine Ausrichtung zum Blickfeld des Probanden zu ermöglichen. Zudem Integration von Schattieren (Shaders) zur Darstellung von Reflektionen [156].

Die Berechnung der virtuellen Realität findet auf einem Rechner statt, der im Folgenden als Virtual Reality-PC (VR-PC) bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um ein Windows 10 basiertes System mit einem Intel Core i5-6600K Prozessor, 24 GB Arbeitsspeicher und einer Grafikkarte des Typs GeForce GTX 1080 Ti. Der

VR-PC ist oberhalb der Montageplattform des Lenkrads befestigt, um eine möglichst kurze Distanz zum Probanden zu erhalten, da die Verwendung des HMD mit Kabelverlängerungen nicht vom Hersteller unterstützt wird.

3.4.6 Geräusch- und Vibrationssystem

Zur Darstellung von Geräuschen werden nicht die im HMD integrierten Kopfhörer, sondern Noise-Cancelling-Kopfhörer des Typs QuietComfort 20 von Bose verwendet. Diese sollen neben der Darstellung von Geräuschen dazu dienen, die unerwünschten Bewegungssystemgeräusche zusätzlich zu dämpfen. In-Ear-Kopfhörer werden der Verwendung von Over-Ear-Kopfhörern vorgezogen, da diese aufgrund des Tragegurtes der Oculus Rift deutlich bessere geräuschisolierende Eigenschaften aufweisen. Nachteil dieser Lösung ist die Notwendigkeit, Ohrpolster verschiedener Größen vorzuhalten, die nach einmaligen Tragen gereinigt werden müssen.

Zur Darstellung von Vibrationen ist an der Montageplatte des Fahrersitzes ein Körperschallwandler mit der Bezeichnung Clark Synthesis TST429 Platinum Transducer angebracht. Dieser ist in der Lage, Frequenzen von 5 Hz bis 17 kHz darzustellen [26]. Zudem befinden sich an der Fahrpedalaufhängung und an der Unterseite des Lenkradmoduls Wandler des Typs Visaton EX 60 S, die Frequenzen im Bereich von etwa 40 Hz bis 20 kHz darstellen können [147]. Die Vibrationsaktoren sind an zwei Stereo-Verstärkern der Firma SMSL angeschlossen. Die Endstufen der Lenkrad- und Fahrpedalwandler weisen eine maximale Leistung von 25 W auf und die des Sitzwandler eine Leistung von 50 W.

3.4.7 Soft- und Hardwarekomponenten zur Ansteuerung

Dieser Unterabschnitt dient dazu, ein genaueres Verständnis von der Steuerung und den Kommunikationsschnittstellen des Simulators zu vermitteln. Häufig erfordert der Betrieb eines Simulators die Verwendung von mehreren PCs und Systemkomponenten, die untereinander kommunizieren müssen. Die Verwendung einer kommerziellen Simulationssoftware stellt meist das dazu benötigte Schnittstellenprotokoll zur Verfügung. Eine entsprechende Software kommt im neu entwickelten Simulator nicht zum Einsatz. Stattdessen wird sich an der Soft- und Hardware-Architektur anderer Simulatoren, die teilweise kommerzielle Software verwenden, orientiert und die im Folgenden beschriebene Struktur aufgebaut. [2,

81, 103, 112, 163, 160]. Zur Beschreibung stellt Bild 3.7 die wichtigsten Hard- und Software-Komponenten des Simulators dar und deren Interaktion untereinander.

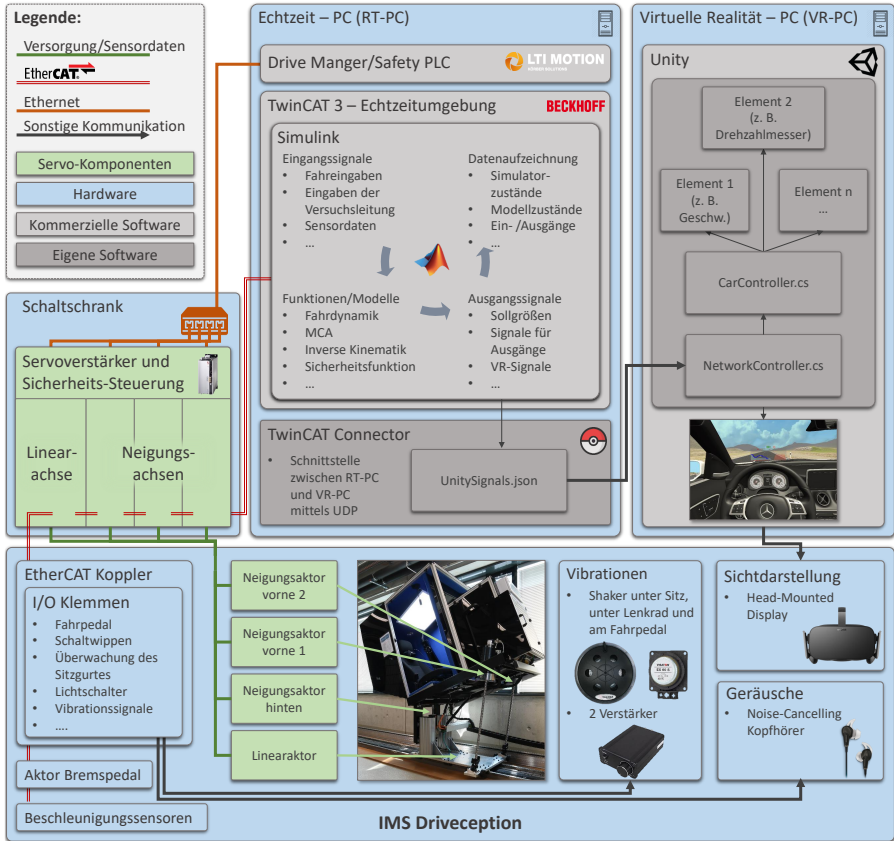


Bild 3.7: Interaktion zwischen RT-PC, VR-PC, Schaltschrank und Simulator

Entsprechend 3.7 Bild lassen sich die Komponenten in die vier Bereiche Realtime-PC (RT-PC), VR-PC, Schaltschrank und Simulator gruppieren. Den Kern der Steuerung bildet der Windows 7 basierte RT-PC mit einer Intel Xeon CPU E3-1232 v3 (3.40 GHz) und 32 GB Arbeitsspeicher. Auf diesem ist die Software TwinCAT 3 installiert, die es ermöglicht, PC-basierte System als Echtzeitsteuerung zu nutzen. TwinCAT 3 erlaubt es, Modelle aus der Simulationsumgebung Simu-

link in die Echtzeitsteuerung einzubinden und über das Feldbussystem EtherCAT mit anderen Teilnehmern zu kommunizieren. Die Vorteile dieser Lösung bestehen darin, dass der EtherCAT-Bus in der Automatisierungstechnik einen Kommunikationsstandard darstellt, der über eine normale PC-Netzwerkkarte aufgebaut werden kann. Es ist folglich möglich, mit gängiger, kostengünstiger Hardware (PC und Ethernetkabel) eine Echtzeit-Kommunikation mit mehreren hundert EtherCAT-Teilnehmern (bspw. den Servoreglern) gleichzeitig aufzubauen und diese mittels Simulink anzusteuern [43]. Somit ist es möglich, entsprechend einer Rapid-Control-Prototyping-Umgebung, flexible Modelle und Funktionen zum Betrieb des Simulators in Simulink zu entwickeln und direkt mit den Ein- und Ausgängen der Automatisierungsgeräte zu verknüpfen.

Die auf dem RT-PC installierte Software Drive Manager dient zur Inbetriebnahme und Konfiguration der Servoregler. Zudem lässt sich eine in den Servoreglern integrierte Sicherheitssteuerung programmieren. Die Kommunikation erfolgt über eine separate Ethernet-Schnittstelle und ist unabhängig vom EtherCAT-Kanal. Der mit TwinCAT 3 virtualisierte Teil des RT-PC führt mehrere Tasks mit Zykluszeiten von $t_s = 1$ ms aus. Die höchste Priorität ist der Task zugeordnet, die das zentrale Simulinkmodell zur Berechnung der Positionsvorgaben ausführt. Die implementierten Funktionen und Modelle richten sich nach der Fahraufgabe bzw. der Untersuchung. Ist die Berechnung einer Task abgeschlossen, werden die Ausgangssignale des Modells an die EtherCAT-Teilnehmer gesendet. Im konkreten sind dies vier Komponenten: Die Servoregler, welche die Aktoren auf die berechneten Positionsvorgaben regeln, ein EtherCAT Koppler zum Anschluss von digitalen und analoge Ein- und Ausgangsklemmen, der Bremspedalaktor und 3-Achs-Beschleunigungssensoren, die auf Kopf- und Hüfthöhe in der Fahrgastzelle angebracht sind. Die Signalversorgung der Vibrationsaktoren bzw. der entsprechenden Verstärker und der Kopfhörer erfolgt über analoge Ausgangsklemmen am EtherCAT-Koppler. Die entsprechenden Ausgangsklemmen werden mit einem einstellbaren ganzzahligen Vielfachen der Zykluszeit abgetastet (Oversampling), sodass Geräusch- bzw. Vibrationensignale mit Frequenzen bis zu 50 kHz dargestellt ausgegeben werden können. Als letzte Hardwarekomponente im Simulator ist an dieser Stelle das HMD zur Sichtdarstellung zu nennen, dessen Bilder auf dem VR-PC berechnet werden. Die Kommunikation zwischen dem RT-PC und dem VR-PC ist unidirektional ausgeführt, sodass lediglich Signale vom RT-PC zum VR-PC bzw. die Entwicklungsumgebung Unity gesendet werden. Innerhalb von Entwicklungsumgebung erfolgt die Weiterleitung an Skripte, die mit den in

Unterabschnitt 3.4.5 beschriebenen bzw. in Tabelle 3.7 genannten Komponenten verknüpft sind.

3.4.8 Softwareseitige Sicherheit

Zum gefahrenfreien Betrieb des Simulators sind softwareseitig drei Sicherheits-ebenen umgesetzt. Die erste Ebene, die vor allen anderen eingreift, ist in Simulink implementiert. Diese beinhaltet folgende Überwachungen:

- **Anschnallgurtüberwachung:** Ist der Sicherheitsgurt nicht eingesteckt, lässt sich das Bewegungssystem zwar aktivieren, es verharrt jedoch im Stillstand. Sollte der Proband sich während der Bewegung des Simulators abschnallen, werden die Ausgänge des versuchsspezifischen Modells überschrieben durch lineare Beschleunigungsrampen, die alle Aktoren mit einer definierten Beschleunigung in den Stillstand versetzen.
- **Geschwindigkeitsabhängige Positionsüberwachung:** Diese Funktion berechnet zu jedem Rechenschritt aus der aktuellen Geschwindigkeit der Aktoren und einer aktorindividuellen Verzögerung die notwendige Strecke bis zum Stillstand. Überschreitet die Summe aus aktueller Position und dieser Strecke einen Grenzwert, wird, wie im Falle des Abschnallens, eine Verzögerung in den Stillstand eingeleitet.
- **Achsendlagenüberwachung:** Werden vom versuchsspezifischen Modell Aktorpositionen berechnet, die zu einer Überschreitung von Grenzwerten führen, so wird das Bewegungssystem deaktiviert. In diesem Fall werden die Bremsen der Neigungsaktoren geschlossen und der Schlitten gleitet mit der Restgeschwindigkeit in den Stillstand.
- **Differenzüberwachung vordere Aktoren:** Überschreitet der Positionsunterschied zwischen den beiden vorderen Aktoren einen Wert von 200 μm , wird das Bewegungssystem deaktiviert bzw. wird eine Aktivierung nicht zugelassen.

Die zweite Ebene an Sicherheitsfunktionen ist in den Servoreglern implementiert. Diese beinhalten eine weitere Achsendlagenüberwachung mit etwas weiter gefassten Grenzwerten, verglichen zu den Werten in Simulink. Zudem ist eine

Geschwindigkeitsüberwachung implementiert, die zu einer Abschaltung des Bewegungssystems führt, sobald Grenzwerte überschritten werden. Die im Servoregler implementierten Funktionen wirken im Gegensatz zu den Simulinkfunktionen auch wenn einzelne Achsen im Handbetrieb gesteuert werden, bspw. während der Referenzierung von Achsen ohne Absolutwertgeber.

Die dritte Ebene ist die integrierte Sicherheitssteuerung der Servoregler. Diese wird unabhängig vom Servoregler parametrisiert und ermöglicht ein Sicherheits-Integritätslevel (SIL) von 3 für die Auswertung der Sensorik aller Achsen gemäß EN 61508 [69]. Mit der Sicherheitssteuerung ist eine weitere Geschwindigkeitsüberwachung für die Linearachse umgesetzt. Im Falle einer Geschwindigkeitsüberschreitung oder eines vom Servovestärker erkannten Fehlers werden über die Kommunikationskanäle der Sicherheitssteuerung Fehlermeldungen an die weiteren drei Servoregler gesendet, was zur Abschaltung des Bewegungssystems führt.

3.5 Berechnung von Trajektorien

Zur Klärung der Forschungsfragen werden vordefinierte Fahrscenarien verwendet, deren Grundlage aufgezeichnete Beschleunigungsprofile bilden. Unter den möglichen Fahrscenarien kommt dem Lastwechselmanöver eine besondere Rolle zu, da dieses, wie in Abschnitt 2.6 dargelegt, für die Untersuchung fahrbarkeitsrelevanter Kriterien dient und ohne Tilt-Coordination in den Bauraumgrenzen dargestellt werden kann. Für Untersuchung mit diesem Manöver ist es wünschenswert, die Ausprägung bestimmter Anteile, bspw. die Amplitude der Ruckelschwingung, gezielt variieren zu können, um den Einfluss auf die Wahrnehmung zu erforschen. Aus diesem Grund wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, ein Lastwechselprofil gezielt in bestimmten Bereichen zu variieren. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist der Arbeit von Ronellenfitsch zu entnehmen [119]. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt jedoch auf der Untersuchung eines vorausschauenden MCA, mit dem das gesamte Spektrum längsdynamischer Manöver im Simulator abgebildet werden soll, insofern die Grenzen des Bewegungssystems es zulassen. Aus diesem Grund wird im darauffolgenden Unterabschnitt die Umsetzung eines optimierungsbasierten MCA mit vorausschauendem Verhalten beschrieben, welcher im Rahmen der Arbeit von Thein entwickelt wurde[142].

3.5.1 Nachbildung des Lastwechselmanövers

Die im linken Teil von Bild 3.8 gezeigte Referenzbeschleunigung \ddot{x}_{ref} soll mit dem Simulator dargestellt werden und das nur durch Ausnutzung des horizontalen Freiheitsgrads. Des Weiteren sollen Bereiche gezielt und unabhängig voneinander verändert werden können. Im Konkreten gemeint sind der Gradient des Beschleunigungsanstiegs, die maximale Beschleunigung sowie die Amplitude und Frequenz des Ruckelns. Erzielt wird dies durch eine Nachbildung des Profils \ddot{x}_{ref} durch Funktionen. Entsprechend Bild 3.8 erfolgt zuerst eine Aufteilung der Referenzbeschleunigung \ddot{x}_{ref} in eine Zug- und eine Schubphase. Die Nachbildung der Zugphase infolge des Tip-ins erfolgt durch eine Reihe von harmonischen Funktionen der Form [23, S. 3]:

$$\ddot{x}_{\text{TPh}}(t) = \sum_{n=1}^q a_n \cdot \sin(b_n \cdot t + c_n), \quad (3.12)$$

mit der Zeit t , den Amplituden a_n , den Frequenzen b_n und den Phasen c_n und dem Summen-Endwert q . Durch Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Nachbildungen zeigt sich, dass in den meisten Fällen eine ausreichende exakte Nachbildung durch eine Sinussumme mit $q = 6$ Termen erreicht wird.

Zur Nachbildung der abklingenden Oszillation der Schubphase eignet sich ein exponentiell abfallender Sinus der Form

$$\ddot{x}_{\text{Ph},1}(t) = d + h \cdot e^{-p \cdot t} \cdot \sin(m \cdot t + o). \quad (3.13)$$

Darin enthalten sind das Niveau der Verzögerung d , die Amplitude der Ruckelschwingung h , die Ruckelfrequenz m , der Nullphasenwinkel o und dem Exponent p , der die Abnahme der Schwingungsamplitude bestimmt. Die Schätzung der Parameter beider Funktionen erfolgt in Matlab mittels des Trust-Region-Verfahrens [71, S. 484]. Anhand des linken Teils von Bild 3.8 ist zu erkennen, dass durch die Nachbildung mit den genannten Funktionen eine Lücke im Bereich des Übergangs von der Zug- in die Schubphase besteht. Eine lineare Funktion stellt daher das Bindeglied zwischen den beiden Verläufen dar. Zur Verbindung wird am Ende des Verlaufs der Sinussumme und am Anfang der exponentiell abklingenden Oszillation jeweils ein Punkt ermittelt mit nahezu identischer Steigung, zwischen denen die lineare Funktion eingefügt wird. Mit diesen Schritten ist die Nachbildung des Manövers vollständig erreicht.

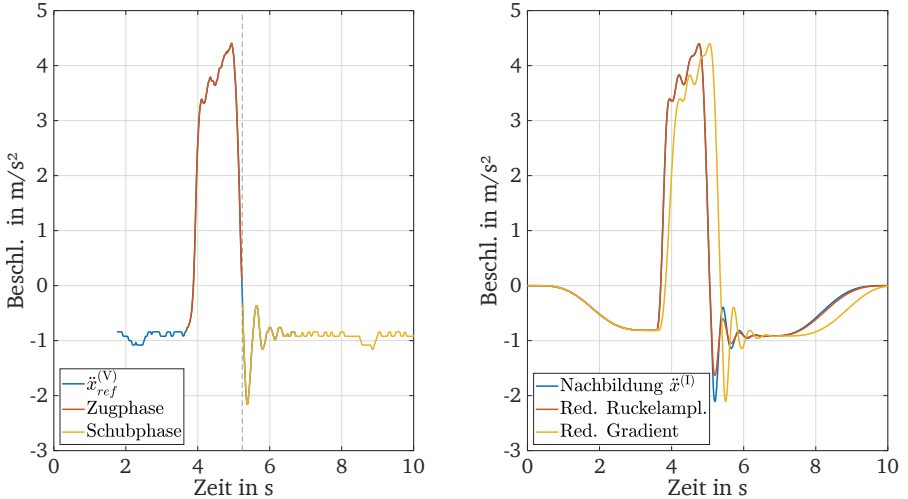


Bild 3.8: Modifizierung des Lastwechselprofils: Links die Aufteilung eines Referenzsignals in eine Zug- und Schubphase. Rechts die Nachbildung, eine isolierte Veränderung der Ruckelamplitude und des Beschleunigungsgradienten

Die Manipulation der Manöverbereiche erfolgt während der Echtzeitberechnung der Funktionen durch vorherige Variation der geschätzten Parameter wie folgt. Während der Simulation werden die kontinuierlichen Funktionen zeitlich diskret berechnet. Die Variation des Beschleunigungsgradienten erfolgt durch eine Manipulation des Zeitvektors. So wird nicht der Beschleunigungsgradient selbst verändert, sondern der Bereich der aufsteigenden Beschleunigungsflanke beschleunigt oder verzögert wiedergegeben. Die Variation des maximalen Beschleunigungswertes des gesamten Manövers erfolgt durch Veränderung der Amplituden a_n der Funktion (3.12). Durch Einfügen der Faktoren q_A und q_F in Gleichung (3.13) erfolgt die Änderung der Schwingungsamplitude bzw. -frequenz der Schubphase. Während die Änderung der Amplitude keinen Einfluss auf den qualitativen Verlauf hat, muss bei Änderung der Frequenz darauf geachtet werden, dass der Nullphasenwinkel erhalten bleibt, um den Übergang zwischen Zug- und Schubphase weiterhin zu gewährleisten. Die nachfolgende Modifikation von Gleichung (3.13) erhält die Phase zu Beginn des abklingenden Sinus:

$$\ddot{x}_{Ph,2}(t) = d + q_A \cdot h \cdot e^{-k \cdot t} \cdot \sin(q_F \cdot m \cdot t + o - (q_F - 1) \cdot m \cdot t_C). \quad (3.14)$$

Der zusätzlich eingeführte Parameter t_C entspricht dem vorab errechneten Endzeitpunkt der Sinussumme $\ddot{x}_{\text{TPh}}(t)$. Mit Hilfe dieser Information erfolgt die Berechnung der Endsteigung der Sinussumme und die Steigung des linearen Übergangs. Der rechte Teil des Bilds 3.8 zeigt exemplarisch eine Änderung der Ruckelamplitude und des Beschleunigungsgradienten. Die Überlagerung mit dem blauen Referenzprofil verdeutlicht, dass die restlichen Profilanteile von den Änderungen unberührt bleiben.

Die beschriebene Methode wurde unter anderem im Rahmen einer Studie genutzt, um die absolute Wahrnehmungsschwellen im Bezug auf das Ruckeln zu ermitteln. Die Beschreibung und Ergebnisse der Studie sind in der Veröffentlichung [38] enthalten.

3.5.2 Umsetzung eines optimierungsbasierten, vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmus

Dieser Unterabschnitt beschreibt die Umsetzung der im Grundlagenkapitel vorgestellten Optimierung einer Kostenfunktion zur Darstellung einer Referenzbeschleunigung \ddot{x}_{ref} mit dem Simulator (vgl. Unterabschnitt 2.4.2). Um ein Verständnis für das nachfolgende Vorgehen zu entwickeln, soll die Grundidee dieser Methode kurz beschrieben werden.

Betrachtet man die bereits eingeführte allgemeine Form der Kostenfunktion entsprechend Gleichung (2.6)

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} |\ddot{x}^{(P)} - \ddot{x}_{\text{ref}}|_j^2,$$

so ist das Ziel der Optimierung die Unterschiede zwischen der im Simulator wahrgenommenen Beschleunigungen $\ddot{x}^{(P)}$ und der Referenzbeschleunigung \ddot{x}_{ref} zu minimieren. Die wahrgenommene Beschleunigung $\ddot{x}^{(P)}$ setzt sich entsprechend Gleichung (2.4) durch die Horizontalbeschleunigung des Simulators $\ddot{x}^{(I)}$ und dessen Plattform-Neigungswinkel θ , unter Vernachlässigung der Fliehbeschleunigung, zusammen zu

$$\ddot{x}^{(P)} = \ddot{x}^{(I)} \cos \theta + g \sin \theta.$$

Während der Optimierung werden folglich die Größen $\dot{x}^{(1)}$ und θ variiert. Da die Größen nicht frei gewählt werden können, sondern diese, wie auch deren Ableitungen ($\ddot{x}^{(1)}, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$) und Integrale ($\dot{x}^{(1)}, x^{(1)}$), beschränkt sein müssen, muss eine Berücksichtigung der Beschränkung während der Optimierung erfolgen. Dies erfordert es, ein dynamisches Modell für die Optimierung bzw. zur Berechnung der wahrgenommenen Beschleunigungen $\ddot{x}^{(P)}$ zu verwenden, welches alle aufgeführten Zustände beinhaltet. Aus diesem Grund wird im Folgenden vor der Aufstellung des Optimierungsproblems zuerst das verwendete Modell vorgestellt.

Optimierungsmodell des Bewegungssystems

Für die Implementierung der Optimierung wird ein diskretes lineares Zustandsraummodell verwendet. Im Allgemeinen hat dieses die Form

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k,\end{aligned}\tag{3.15}$$

bestehend aus der Systemmatrix \mathbf{A} , der Eingangsmatrix \mathbf{B} , der Ausgangsmatrix \mathbf{C} , der Durchgangsmatrizen \mathbf{D} , dem Zustandsvektor \mathbf{x}_k , dem Ausgangsvektor \mathbf{y}_k und dem Eingangsvektor \mathbf{u}_k zum Zeitpunkt k .

Für die Optimierung wird der Zustandsvektor definiert als

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \dot{x}_k^{(1)} \\ x_k^{(1)} \\ \dot{\theta}_k \\ \theta_k \end{bmatrix},\tag{3.16}$$

sodass die obere Hälfte Zustände des translatorischen Subsystems, mit der Position $x^{(1)}$ und der Geschwindigkeit $\dot{x}^{(1)}$, enthält. In analoger Weise ist in der untere Hälfte die Dynamik des rotativen Subsystems, mit dem Neigungswinkel θ sowie der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$, enthalten. Da die exakte Systemdynamik für die Optimierung irrelevant ist, wird das Übertragungsverhalten der Subsysteme jeweils durch Doppelintegratoren modelliert. Mit der Zykluszeit T_s ergeben sich die folgenden Subsystemmatrizen:

$$\mathbf{A}_{f_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T_s & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{f_2} = \begin{bmatrix} T_s \\ \frac{1}{2}T_s^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{f_2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{f_2} = \mathbf{0}.\tag{3.17}$$

Eingesetzt in ein Gesamtsystem ergibt sich ein Zustandsraummodell der Form

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{f_2} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{f_2} \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{f_2} & 0 \\ 0 & \mathbf{B}_{f_2} \end{bmatrix} \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{f_2} & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_{f_2} \end{bmatrix} \mathbf{x}_k \quad \text{mit } k = 0, 1, \dots, N_p. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Der Eingangsvektor enthält folglich die Beschleunigungen und der Ausgangsvektor die Positionen der Subsysteme:

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \ddot{x}_k \\ \ddot{\theta}_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \theta_k \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Das System aus Gleichung (3.18) beschreibt das Simulatorverhalten lediglich zum jeweils nächsten Zeitschritt. Für einen modellprädiktiven Ansatz muss eine Berechnung für die darauffolgenden Zeitschritte, entsprechend der Länge des Vorhersagehorizont N_p , erfolgen. Für eine Optimierung im Voraus kann hingegen die gesamte Länge der Beschleunigungsreferenz $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ref}}$ herangezogen werden. In beiden Fällen erfordert dies ein iteratives Einsetzen der Zustandsgleichungen zum Zeitpunkt k in den jeweils darauffolgenden nach dem Schema

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{x}_{k+2} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{A}^2\mathbf{x}_k + \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k+1} \\ &\vdots \\ \mathbf{x}_{k+N_p} &= \mathbf{A}^{N_p}\mathbf{x}_k + \mathbf{A}^{(N_p-1)}\mathbf{B}\mathbf{u}_k + \dots + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k+N_p-1}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Es ergibt sich ein neues Zustandsraumsystem der Form

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k+1} \\ \mathbf{x}_{k+2} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{k+N_p} \end{bmatrix}}_{\underline{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{N_p} \end{bmatrix}}_{\underline{\mathbf{F}}} \mathbf{x}_k + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{B} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{N_p-1}\mathbf{B} & \mathbf{A}^{N_p-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{B} \end{bmatrix}}_{\underline{\mathbf{S}}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{u}_k \\ \mathbf{u}_{k+1} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{k+N_p-1} \end{bmatrix}}_{\underline{\mathbf{u}}}. \quad (3.21)$$

Die Unterstreichung markiert Vektoren und Matrizen mit Werten für mehrere Zeitschritte. Die unterstrichenen Größen enthalten somit die Werte für alle Werte der Beschleunigungsreferenz $\underline{\ddot{\mathbf{x}}}_{\text{ref}}$. Die Matrizen $\underline{\mathbf{F}}$ und $\underline{\mathbf{S}}$ sind die System- und Eingangsmatrizen des Bewegungssystems zur Berechnung aller Zustände für die Gesamtlänge der Beschleunigungsreferenz $\underline{\ddot{\mathbf{x}}}_{\text{ref}}$. Die Berechnung ist nur noch abhängig vom aktuellen Zustandsvektor \mathbf{x}_k und den zukünftigen Werten der Eingangsvektoren $\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k+N_p-1}$. Aufgrund der Diagonalform der Systemmatrix \mathbf{A} und der Eingangsmatrix \mathbf{B} sind die Berechnungen der Subsysteme voneinander entkoppelt. Dementsprechend lassen sich auch die Matrizen $\underline{\mathbf{F}}$ und $\underline{\mathbf{S}}$ aufteilen in zwei Modelle welche die Dynamik des rotativen Subsystems ($\underline{\mathbf{F}}_\theta, \underline{\mathbf{S}}_\theta$) und die des translatorischen Subsystems ($\underline{\mathbf{F}}_x, \underline{\mathbf{S}}_x$) beschreiben.

Aufstellen des Optimierungsproblems

Die vorgestellte Kostenfunktion J berücksichtigt nur die Abweichung der wahrgenommenen Beschleunigungen $\ddot{\mathbf{x}}^{(P)}$ von der Referenzbeschleunigung $\ddot{\mathbf{x}}_{\text{ref}}$. Das vollständige Optimierungsproblem enthält noch weitere Elemente J_i , die an späterer Stelle definiert werden. Mit einem Optimierungsalgorithmus soll dementsprechend ein Problem der Form

$$\min_{\mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k+N_p}} J_\Sigma(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}) \quad \text{mit} \quad J_\Sigma = J + \sum_{\forall i} J_i. \quad (3.22)$$

gelöst werden. Die Berechnungen soll unter Berücksichtigung der hergeleiteten Systemdynamik und der Beschränkungen erfolgen:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k \\ \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \\ \mathbf{x}_{\min} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Formuliert man die Kostenfunktion J in Matrixschreibweise

$$J = (\underline{\ddot{\mathbf{x}}}^{(P)} - \underline{\ddot{\mathbf{x}}}_{\text{ref}})^\top \mathbf{H} (\underline{\ddot{\mathbf{x}}}^{(P)} - \underline{\ddot{\mathbf{x}}}_{\text{ref}}), \quad (3.24)$$

kann mit einer Gewichtungsmatrix \mathbf{H} der Einfluss von Abweichungen bzgl. der Referenz zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich stark bewertet werden.

Der Vektor der im Simulator wahrgenommenen Beschleunigung $\underline{\ddot{x}}^{(P)}$ lässt sich aus der Dynamik der Subsysteme des Zustandsraumsystems (3.21) durch

$$\underline{\ddot{x}}^{(P)} = \underbrace{\underline{\mathbf{u}}_{\dot{x}} \cdot \cos(\underline{\mathbf{F}}_{\theta} \mathbf{x}_{\theta} + \underline{\mathbf{S}}_{\theta} \underline{\mathbf{u}}_{\theta})}_{\text{Anteil Translation}} + \underbrace{g \cdot \sin(\underline{\mathbf{F}}_{\theta} \mathbf{x}_{\theta} + \underline{\mathbf{S}}_{\theta} \underline{\mathbf{u}}_{\theta})}_{\text{Anteil Tilt-Coordination}}, \quad (3.25)$$

berechnen, mit dem Neigungswinkel θ ausgedrückt als

$$\theta = \underline{\mathbf{F}}_{\theta} \mathbf{x}_{\theta} + \underline{\mathbf{S}}_{\theta} \underline{\mathbf{u}}_{\theta}. \quad (3.26)$$

Die Vektoren $\underline{\mathbf{u}}_{\dot{x}}$ und $\underline{\mathbf{u}}_{\dot{\theta}}$ enthalten die Entscheidungsvariablen für die translatorische bzw. rotative Beschleunigung aus $\underline{\mathbf{u}}$. In skalarer Form entspricht Gleichung (3.25) somit der im Grundlagenkapitel hergeleiteten Gleichung (2.4) ohne Eulerbeschleunigung:

$$\ddot{x}^{(P)} = \ddot{x}^{(I)} \cos \theta + g \sin \theta.$$

Gestaltung der Kostenfunktion

Die Kostenfunktion aus Gleichung (3.22) enthält Elemente, die im Folgenden definiert werden sollen. Über zusätzliche Terme kann weiterer Einfluss auf das Ergebnis des Optimierungsproblems genommen werden. Die beiden Ausdrücke

$$\begin{aligned} J_1 &= \underline{\mathbf{u}}_{\dot{x}}^{\top} \mathbf{R}_{\dot{x}} \underline{\mathbf{u}}_{\dot{x}} \\ J_2 &= \underline{\mathbf{u}}_{\dot{\theta}}^{\top} \mathbf{R}_{\dot{\theta}} \underline{\mathbf{u}}_{\dot{\theta}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

gewichten über $\mathbf{R}_{\dot{x}}$ den translatorischen Beschleunigungsanteil und über $\mathbf{R}_{\dot{\theta}}$ den der Tilt-Coordination. Die Gewichtungsmatrizen sind Diagonalmatrizen. Um den Anteil der horizontalen Beschleunigung zu reduzieren, müssen folglich die Einträge $\mathbf{R}_{\dot{x}}$ größer gewählt werden. Da bei der Tilt-Coordination der Winkel und nicht die Winkelbeschleunigung das Gefühl einer Beschleunigung hervorruft, kann auch direkt der Winkel über

$$J_3 = (\underline{\mathbf{F}}_{\theta} \mathbf{x}_{\theta} + \underline{\mathbf{S}}_{\theta} \underline{\mathbf{u}}_{\theta})^{\top} \mathbf{R}_{\theta} (\underline{\mathbf{F}}_{\theta} \mathbf{x}_{\theta} + \underline{\mathbf{S}}_{\theta} \underline{\mathbf{u}}_{\theta}) \quad (3.28)$$

gewichtet werden. Es besteht die Möglichkeit, weitere Größen zu gewichten. Die gesamte Kostenfunktion nimmt letztlich die bereits aus Gleichung (3.22) bekannte Form an:

$$J_{ges} = J + \sum_{\forall i} J_i.$$

Die Ergebnisse des Optimierungsprozesses sind die Größen von \mathbf{u}_k . Durch zweifache Integration werden daraus die Trajektorien generiert, um das durch \ddot{x}_{ref} beschriebene Manöver darzustellen.

Bild 3.9 zeigt ein Optimierungsergebnis. Im obersten Plot sind das Referenzsignal $\ddot{x}_{(\text{ref})}$ und die auf der Plattform wahrgenommene Beschleunigung $\ddot{x}^{(P)}$ dargestellt. Letztere ergibt sich aus dem durch die horizontale Bewegung erzeugten Beschleunigungsanteil $\ddot{x}^{(1)} \cos \theta$ und dem durch die Tilt-Coordination erzeugten Anteil $g \sin \theta$. Deutlich zu erkennen ist das prädiktive Verhalten, bei dem die Bewegungsplattform durch eine rückwärtige Bewegung und einen positiven Neigungswinkel vorkonditioniert wird, um die Beschleunigungen des Anfahrmanövers nachbilden zu können. Möglich ist diese durch eine gegenseitigen Kompensation der Beschleunigungsanteile der Horizontalbewegung und der Tilt-Coordination. Der mittlere Plot zeigt die Position und Geschwindigkeit der Horizontalbewegung. Deutlich wird, dass der zur Verfügung stehende Arbeitsraum, trotz des unskaliert dargestellten Anfahrmanövers, nur etwa zur Hälfte ausgenutzt wird. Der unterste Plot zeigt die Größen des rotativen Freiheitsgrades. Der Winkel beträgt im Bereich der maximalen Beschleunigung nahezu 20° und reißt

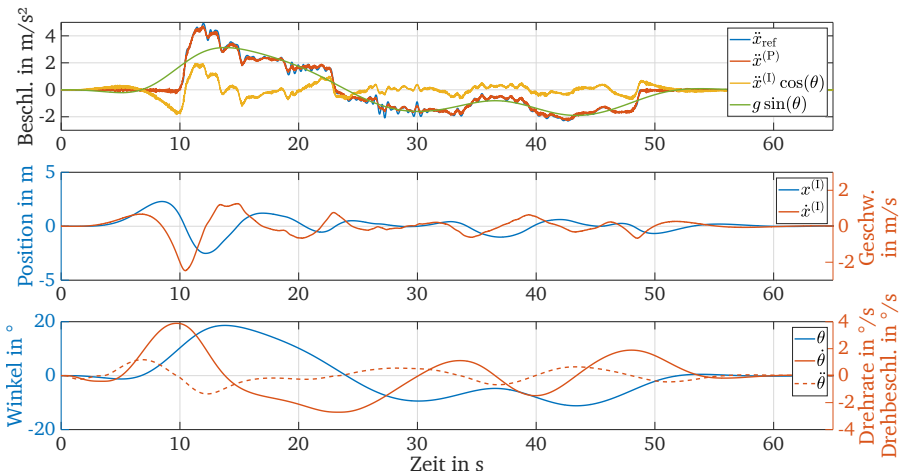


Bild 3.9: MCA Optimierungsergebnis: Im obersten Plot ist die vestibuläre Beschleunigung, resultierend aus der Tilt-Coordination und der linearen Beschleunigung, dargestellt. Darunter jeweils die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Simulatorfreiheitsgrade

den darstellbaren Neigungsbereich des Simulators sehr stark aus. Die Werte der Drehrate und der –beschleunigung verdeutlichen, dass die Rotation unterhalb der Wahrnehmungsschwellen erfolgt. Das Manöver kann folglich unter Berücksichtigung der Beschränkungen, die sich aus der menschlichen Wahrnehmung und dem Arbeitsraum ergeben, unskaliert dargestellt werden.

Algorithmus zur Trajektoriengenerierung

Zur Minimierung des Optimierungsproblems wird das in Matlab implementierte Innere-Punkte-Verfahren verwendet [141, S. 45]. Um die Optimierung auch für längere Beschleunigungsmanöver, die evtl. zeitlich hochaufgelöst vorliegen, verwenden zu können, wird die Optimierung in einen Algorithmus eingebettet, der es ermöglicht, verschiedene Beschleunigungsreferenzen flexibel zur Trajektoriengenerierung zu nutzen. Zur Erläuterung ist in Bild 3.10 ein Schema des Algorithmus dargestellt. Zuerst müssen die Beschränkungen und die in den vorherigen Kapiteln eingeführten Gewichtungsmatrizen definiert werden. Beschränkungen können für die horizontale Bewegung x_k und die Neigung θ sowie deren Ableitungen (bis einschließlich der dritten Ableitung) vorgeben werden. Da der Ruck im verwendeten Systemmodell (3.21) weder als Eingang noch als Zustand verwendet wird, erfolgt eine Berechnung anhand der Differenzbildung zwei aufeinanderfolgender Eingänge ($\mathbf{u}_k = [\ddot{x}_k^{(l)} \ddot{\theta}_k]^T$). Somit ist es möglich, diese an den Optimierungsalgorithmus zu übergeben.

Im ersten Schritt der Vorverarbeitung wird das Referenzsignal gefiltert, um Rauschanteile und auf dem Bewegungssystem nicht darstellbare Frequenzanteile zu extrahieren. Eine zweite Filterung dient dazu den Frequenzbereich zu trennen. Der erhaltene hochfrequente Teil wird nicht für die Optimierung verwendet, sondern später direkt mit dem translatorischen Freiheitsgrad dargestellt. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass die Abtastfrequenz des niederfrequenten Teils ohne Verletzung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorem [70, S. 387] reduziert werden kann, wodurch eine Reduktion der Optimierungsdauer erzielt wird. Da die alleinige Darstellung der hochfrequenten Anteile den horizontalen Arbeitsraum kaum ausnutzt, ist dieser Schritt in Bezug auf die Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems unkritisch. Nach der Reduktion der Abtastfrequenz beginnt die Optimierung. Dieser liegen die Beschränkungen als Vektoren vor. Neben der Einhaltung der Arbeitsraumgrenzen und Berücksichtigung der Wahrnehmungsschwellen dienen diese dazu, am Ende einer Fahrt eine Positionierung des Simulators ohne

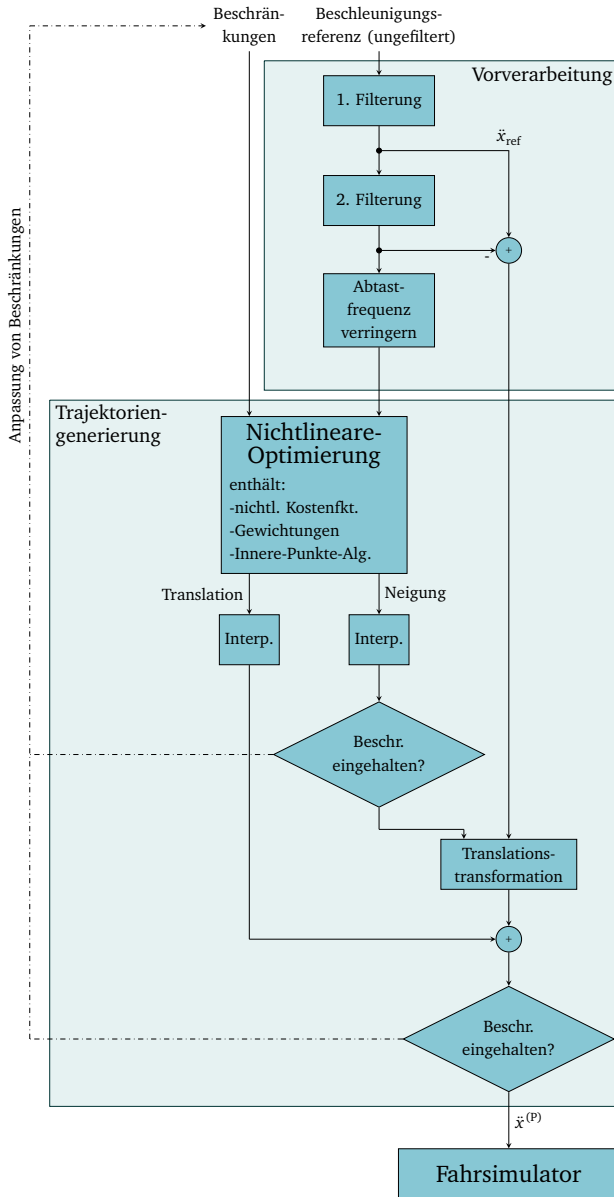


Bild 3.10: Algorithmus zur Trajektoriengenerierung

Bewegung in der Neutrallage zu erzwingen. Dies erfolgt durch Anpassung der letzten Werte der Vektoren.

Das Ergebnis der Optimierung sind die Vektoren $\ddot{x}_k^{(I)}$ und $\ddot{\theta}_k$. Die darauffolgenden Schritte umfassen die Anpassung der zeitlichen Auflösung der Optimierungsergebnisse an die Zykluszeit des Simulators und eine Addition mit den zuvor herausgefilterten hochfrequenten Anteilen. Durch Integration erhält man die Geschwindigkeiten und Positionen, woraufhin abschließend eine Überprüfung der Einhaltung der Beschränkungen erfolgt.

3.6 Analyse des Simulators

Um die Tauglichkeit des Simulators für das Erreichen von Untersuchungszielen sicherzustellen, muss Kenntnis über dessen Leistungsfähigkeit bestehen. Evtl. Schwächen der Testumgebung schließen die Durchführung bestimmter Untersuchungen aus oder erfordern eine Einbeziehung der Schwächen in die Interpretation der Ergebnisse. Dementsprechend widmet sich dieser Abschnitt der Analyse des Simulators. Diese umfasst eine Ermittlung der darstellbaren Neigungswinkel, eine Abschätzung der maximalen Beschleunigung des Linearsystems, eine Messung der Latenzen des Sichtsystems sowie der Latenzen des Bewegungssystems und eine Analyse des Übertragungsverhaltens des Linearsystems.

3.6.1 Darstellungsgrenzen

Es soll ermittelt werden, welche Neigungswinkel in Abhängigkeit der Lage des Drehzentrums und welche translatorischen Beschleunigungen mit dem Bewegungssystem darstellbar sind. Zur Ermittlung der möglichen Neigungswinkel werden die im Servoregler hinterlegten Achsendlagenüberwachungen (vgl. Unterabschnitt 3.4.8) in ein Simulationsmodell der Kinematik eingetragen und Winkelkombinationen von $\pm 25^\circ$ kombiniert mit Drehzentrumshöhen r von 0 m bis 5 m simuliert. Bild 3.11 zeigt die Ergebnisse: Der blaue Bereich markiert die darstellbaren Kombinationen. Es ist ersichtlich, dass der Bereich negativer Winkel kombiniert mit Drehzentren unterhalb von etwa 1,2 m durch den unteren Grenzwert und im Bereich positiver Winkel durch den oberen Grenzwert der vorderen Aktoren eingeschränkt wird. Der Bereich oberhalb von 1,2 m wird primär durch den maximalen Stellweg des hinteren Aktors eingeschränkt.

Die Ermittlung der maximalen Beschleunigung des Linear-systems wird aus der Abschätzung der bewegten Masse abgeleitet. Die Schätzung erfolgt mittels der Methode der kleinsten Quadrate anhand eines Grey-Box-Modells [70, S. 49]. Dazu sollen anhand von Messfahrten aus den gemessenen Positionen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und kraftproportionalen Aktorströmen die Parameter eines Ein-Massenschwinger (Masse, Dämpfung und Steifigkeit) berechnet werden. Die Schätzung könnte auch mit einer ungefesselten Masse erfolgen, jedoch stellt der geschätzte Wert der Steifigkeit einen ersten Indikator für die Plausibilisierung des Messergebnisses dar. Zur Umrechnung der Aktorströme wird die vom Linearaktorhersteller angegebene Stromkonstante von $84,2 \frac{\text{N}}{\text{A}}$ verwendet. Um möglichst ausgeprägte Stromflanken bzw. eine hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten, werden durch Beschleunigungssprünge von $\pm 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ Geschwindigkeiten von $\pm 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $\pm 2,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ mit Schritten von $0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erzeugt und in einem Bereich von 0 m bis 3 m dargestellt. Alle notwendigen Signale werden aus dem Servoregler des Linearaktors ausgelesen. Die aufgezeichneten Daten werden mit einem Butterworth-Vorwärts-Rückwärts-Filter mit einer effektiven Ordnung von 2 und mit einer Eckfrequenz von 100 Hz gefiltert. Der Versuch umfasst fünf Messwiederholungen mit einer leeren Fahrgastzelle und mit einer Zusatzmasse von 93 kg.

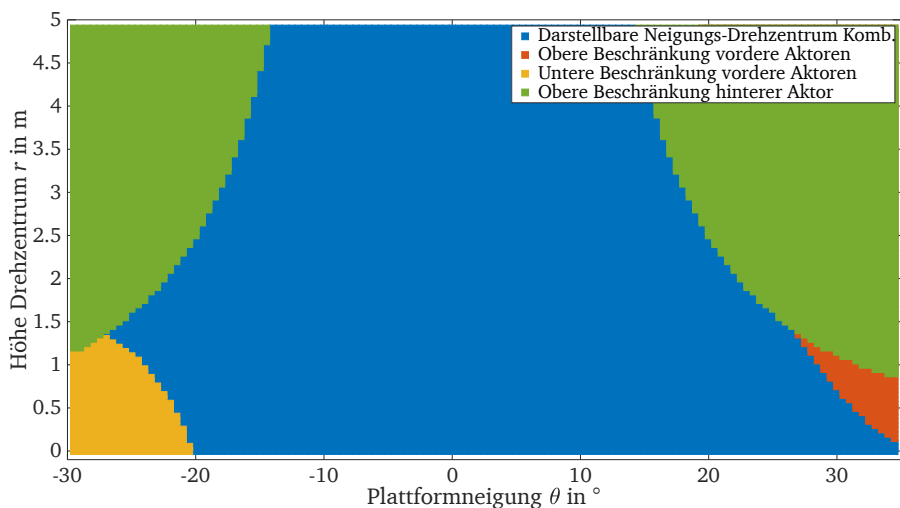


Bild 3.11: Mit dem Bewegungssystem darstellbare Neigungswinkel-Drehzentrum-Kombinationen

Anhand der definierten zusätzlichen Masse wird der Fehler der Schätzung berechnet. Die Ergebnisse der Parameterschätzung sind in Tabelle 3.8 aufgelistet. In beiden Schätzungen erreicht die Steifigkeit einen zu vernachlässigenden Wert.

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Parameterschätzung, angegeben als Mittelwert mit Standardabweichung

Zusatzmasse	Masse	Dämpfung	Steifigkeit
0 kg	(468 ± 0, 1) kg	(152 ± 1, 8) $\frac{Ns}{m}$	(2, 1 ± 0, 1) $\frac{N}{m}$
93 kg	(553 ± 0, 3) kg	(158 ± 1, 1) $\frac{Ns}{m}$	(1, 9 ± 0, 3) $\frac{N}{m}$

Die Werte der Dämpfung werden als plausibel angenommen aufgrund der vorhandenen Führungsreibung. Aus der Differenz zwischen tatsächlicher und geschätzter Zusatzmasse berechnet sich ein Fehler von 9,65 %. Die tatsächliche Masse des Simulators beträgt somit etwa 513 kg. Aus dieser Masse und den Spezifikationen des Linearaktors errechnet sich die mögliche Beschleunigung zu etwa $\pm 8 \frac{m}{s^2}$. Tabelle 3.9 listet zusammenfassend die Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems auf.

Tabelle 3.9: Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems

Freiheitsgrad	Weg	Geschw.	Beschl.
Translation	±5 m	±5 $\frac{m}{s}$	±8 $\frac{m}{s^2}$
Rotation	±25°	> ±6 $\frac{°}{s}$	> ±6 $\frac{°}{s^2}$

3.6.2 Messung der Sichtsystem- und Bewegungssystemlatenz

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter der Latenz die Zeitspanne zwischen einer Fahrpedaleingabe und den messbaren Reaktionen des Visualisierungs- und des Bewegungssystems verstanden. Latenzen führen zu einer Asynchronität zwischen der Sicht und der Bewegung mit negativen Auswirkungen auf den Realitätsgrad. Studien mit aktiv fahrenden Probanden erfordern, dass die Latenzen innerhalb bestimmter Grenzen liegen, um ein unrealistischer Fahreindruck zu vermeiden, der entstehen kann, wenn die Simulatorreaktion infolge einer Fahrpedaleingabe zu sehr verzögert ist [76]. Als Orientierung für solche Grenzen können die in der Fahrzeugergonomie als „sofort“ empfundenen Ansprechzeiten dienen. Bubb

gibt für diese einen Bereich von 50 ms bis 150 ms an [22, S.330]. Laut Simon gilt auf Grundlage von Erfahrungswerten eine Ansprechzeit von 250 ms als noch akzeptabel [130, S. 31]. Im Folgenden wird das Vorgehen beschrieben, mit dem sowohl die Latenz des Sichtsystems als auch die des Bewegungssystems ermittelt wird.

Aufbau und Durchführung

Die Bestimmung der Sichtsystemlatenz erfolgt anhand von Bildwechseln die durch eine Stellungsänderung des Fahrpedals verursacht werden. Die Helligkeitsunterschiede infolge der Bildwechsel werden mit einer Photodiode gemessen und synchron mit dem Fahrpedalsignal aufgezeichnet. Aus der Zeitspanne zwischen den Signalen erfolgt die Berechnung der Latenz. Die Ermittlung der Bewegungssystemlatenz erfolgt in analoger Weise durch eine Positionsänderung von 0,1 mm jeder Achse infolge der Fahrpedalbetätigung. Für den Versuch wird die Fahrpedalposition in einen binären Wert umgerechnet, der oberhalb einer Stellung von 50 % den Wert 1 annimmt. Für die Messung der Sichtsystemlatenz wird dieser Binärwert von Simulink (RT-PC) als Geschwindigkeit ausgegeben und mit dem TwinCAT Connector an Unity (VR-PC) gesendet. Die Änderung der Bildhelligkeit erfolgt in Unity durch eine Routine, die ein Bildwechsel von Weiß nach Schwarz bewirkt, sobald der Binärwert bzw. die Eingangsgeschwindigkeit von 0 abweicht. Parallel dazu verläuft in Simulink ein Signalpfad, der aus dem Binärwert eine Positionsänderung von 0,1 mm berechnet. Dieser Positionswert dient als Sollposition für alle Achsen des Bewegungssystems. An der Bild- als auch an der Bewegungserzeugung sind mit dieser Topologie alle Komponenten in der Form an der Messung beteiligt, wie sie auch während späterer Probandenstudien zum Einsatz kommen. Die einfache Umrechnung in Simulink reduziert den Einfluss der Modellrechnungszeit zur Umwandlung der Signale auf 1 ms. Demzufolge wird die minimale Latenz über die gesamten Übertragungspfade gemessen.

Als Sensor dient eine an der Innenseite der Oculus Rift befestigte Photodiode zur Messung der Helligkeit. Um den Einfluss von äußeren Lichtquellen zu minimieren, befindet sich die Datenbrille während der Messung in einem abgedunkelten Bereich. Die verwendete Photodiode ist vom Typ TSL250R der Firma Taos und mit einer Reaktionszeit von 260 μ s spezifiziert. Die Messung der Akteurpositionen erfolgt durch den jeweiligen Positionsgeber jedes Aktors. Alle für die Messung relevanten Signale werden mit einer synchronisierter Zykluszeit von

1 ms in EtherCAT gemessen und gespeichert. Die Versuchsdurchführung umfasst jeweils 10 Messungen für die Ermittlung der Sichtsystem- und Bewegungssystemlatenz, bei denen das Fahrpedal schlagartig betätigt und losgelassen wird.

Auswertung

Eine Messung zur Ermittlung der Sichtsystemlatenz zeigt die linke Hälfte von Bild 3.12. Ausgehend von der fallenden Signalflanke des Fahrpedal-Binärwerts wird die Zeitspanne gemessen, die vergeht, bis die normierte Spannung der Photodiode aufgrund des weißen Bildes einen Wert von 0,95 überschreitet. Der im Bild zu sehenden periodische Verlauf der Diodenspannung ist auf die Bildwiederholfrequenz der Oculus Rift von 90 Hz zurückzuführen. Eine Messung der Bewegungssystemlatenz zeigt die rechte Hälfte von Bild 3.12. Die Latenz bildet die Zeit zwischen der aufsteigenden Flanke des Fahrpedal-Binärwerts und der ersten Aktorreaktion, die sich deutlich vom Sensorrauschen absetzt. Hierzu wird als Aktorreaktion für alle Achsen ein Positionswert von 0,02 mm festgelegt. Tabelle 3.10 listet die aus den 10 Messungen gemittelten Latenzen aller untersuchten Komponenten auf. Die Latenz des Sichtsystems liegt mit 71 ms und

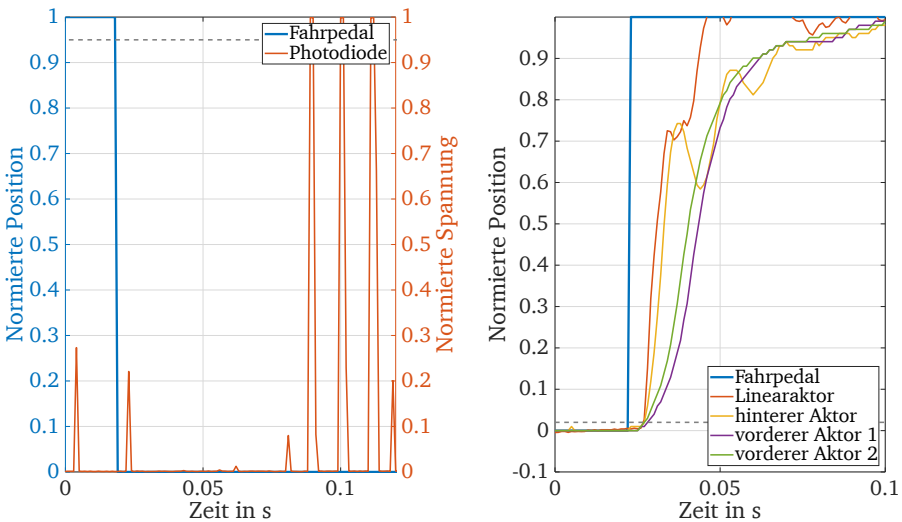


Bild 3.12: Signale der Latenzmessung: Links die Messung des Sichtsystems; Rechts die Messung des Bewegungssystems

Tabelle 3.10: Ergebnisse der Latenzmessungen

Latenz	Mittelwert und Standardabw.
Sichtsystem	(71 ± 7) ms
Linearaktor	(6 ± 0) ms
hinterer Aktor	(7 ± 3) ms
vorderer Aktor 1	(8 ± 4) ms
vorderer Aktor 2	(7 ± 0) ms

einer Standardabweichung von 7 ms um eine Zehnerpotenz höher als die der Aktoren. Die Latenz setzt sich zum Großteil aus der Bildwiederholrate und der in Unterabschnitt 3.4.7 genannten Schnittstelle zur Kommunikation zwischen dem RT-PC und dem VR-PC zusammen. Zum aktiven Fahren liegen die Werte, gemessen an der Ansprechzeit eines Fahrzeugs, noch im sehr guten Bereich. Die Latenzen der Aktoren sind mit 6 ms bis 8 ms sehr gering und liegen leicht unterhalb der Werte sehr performanter Bewegungssysteme [19, 144]. Gegenüber den gängigen Hexapod-Linearachse-Kombinationen zeigt sich zudem ein sehr geringer Unterschied in den Latenzen der Linearachse und den zur Neigung verwendeten Aktoren [45]. Auf Grundlage der ermittelten Werte kann durch eine verzögerte Ausgabe der Positionsvorgaben eine Synchronität zwischen den visuellen und vestibulären Reizen sichergestellt werden.

3.6.3 Übertragungsverhalten des Bewegungssystems

Der Simulator stellt ein schwingungsfähiges System dar, was zu einer Verzerrung der darzustellenden Beschleunigungen aufgrund des dynamischen Eigenverhaltens führen kann. Da die Regelgrößen die Positionen der Aktoren sind und nicht die auf Höhe des vestibulären Systems wahrzunehmende Beschleunigung, kann das Eigenverhalten nicht durch die Regelung kompensiert werden. Aus diesem Grund muss das Übertragungsverhalten des Bewegungssystems analysiert werden, um Kenntnis über die Stärke der Verzerrung zu erlangen und ggf. durch konstruktive Änderungen oder Filterung der Eingangssignale eine Verbesserung zu erzielen. Da die hochfrequenten Anteile der Beschleunigungsreferenzen ausschließlich mit der translatorischen Achse dargestellt werden, ist das Übertragungsverhalten dieser Gegenstand der nachfolgenden Untersuchung.

Aufbau und Durchführung

Die Identifikation des Übertragungsverhaltens lehnt sich an das im Agard-144 Advisory Report beschriebene Vorgehen an [86]. Dieser Bericht beinhaltet eine Vorschrift zur Messung und Dokumentation der dynamischen Charakteristiken von Flugsimulator-Bewegungssystemen und wird auch für Fahrsimulatoren verwendet [144, 105, 120]. Die Vorschrift umfasst u. a. die Schätzung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens anhand von Messungen mit sinusförmigen Beschleunigungssignalen verschiedener Frequenzen und Amplituden als Erregung. Das im Agard-144 Advisory Report beschriebene Vorgehen ist verbunden mit einem hohen zeitlichen Aufwand und fehlenden Informationen über das Übertragungsverhalten zwischen den geprüften Frequenzstellen. Aufgrund dessen wird vom vorgeschlagenen Vorgehen abgewichen und ein zweiminütiger Gleitsinus mit Frequenzen von 0 Hz bis 40 Hz (vgl. Bild 3.13) als Anregung verwendet. Mit diesem Signal werden entsprechend Tabelle 3.11 sechs Versuchsreihen durchgeführt. Um den Einfluss stochastischer Anteile auf das Messergebnis

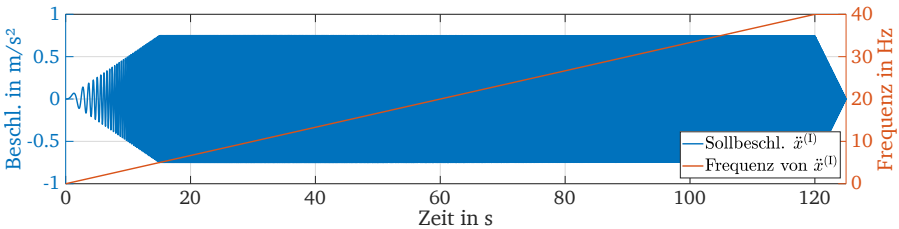


Bild 3.13: Sollbeschleunigung und Frequenzanstieg zur Schätzung des Übertragungsverhaltens. Die Frequenz wird innerhalb von 120 s von 0 Hz auf 40 Hz gesteigert.

Tabelle 3.11: Versuchsvariationen zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens

Versuchsreihe	Amplitude in $\frac{m}{s^2}$	Zusatzmasse, Anbringung
1	0,5	0 kg
2	0,75	0 kg
3	1	0 kg
4	0,75	60 kg, Sitz des Aufbaus
5	0,75	60 kg, Fußraum des Cockpits
6	0,75	Jeweils 1,4 kg, Vordere Aktoren

zu reduzieren, besteht jede Messreihe aus fünf Messwiederholungen. Die Messreihen 1 bis 3 unterscheiden sich in der Amplitude des Sollbeschleunigungssignals, um den Einfluss nichtlineare Effekte auf das Übertragungsverhaltens zu überprüfen. Die Durchführung der Messreihen 4 bis 6 begründet sich darin, dass der Simulator aus mehreren beweglichen Komponenten besteht und eine negative Beeinflussung des Gesamtübertragungsverhalten aufgrund von Relativbewegungen der Komponenten nicht auszuschließen ist. Die Messungen mit Zusatzmassen an verschiedenen Anbringungsorten liefern den nötigen Erkenntnisgewinn über die Zusammensetzung des Gesamtübertragungsverhaltens und ermöglichen überdies eine Abschätzung des Systemverhaltens mit Probanden. Die Anbringung von Zusatzmassen auf dem Sitz, auf dem Fußraum des Cockpits und an den vorderen Aktoren wurde gewählt, um den Einfluss der folgenden Komponenten auf das Übertragungsverhalten des Simulators zu überprüfen:

- Der **neigbare Aufbau** umfasst alle Komponenten, die auf dem Trägerrahmen angebracht sind. Die Trägheitskräfte in Richtung der x-Achse werden über die rückseitigen Versteifungsprofile am Schlitten abgestützt.
- Das **verschiebbare Cockpit**, welches mit einer Sitzschiene auf der Vorderseite des neigbaren Aufbau befestigt ist.
- Die **vorderen Aktoren**, die mit Stehlagern am Trägerrahmen gelagert sind. Die Schwerpunktlage der Aktoren liegt oberhalb des Lagerpunkts.

Die Beschleunigungen werden mit dem 3-Achs-Beschleunigungssensor gemessen, der auf Hüfthöhe in der Fahrgastzelle angebracht ist. Die Aufzeichnung der Eingang- und Ausgangssignale erfolgt mit einer Zykluszeit von 1 ms. Das Übertragungsverhalten des Sensors wurde zuvor durch Abgleich mit einem kalibrierten Referenzsensor auf einem elektrodynamischen Schwingerreger überprüft. Zudem wurde das Sensorsignal um den Steigungs- und Offsetfehler korrigiert.

Auswertung

Die aufgezeichneten Daten, im Weiteren als Eingangs- und Ausgangsbeschleunigungen bezeichnet, werden vor der Verarbeitung mit einem Butterworth-Vorwärts-Rückwärts-Filter mit einer effektiven Ordnung von 2 und einer Eckfrequenz von 50 Hz gefiltert. Zudem erfolgt eine Korrektur der Ausgangsbeschleunigungen mit der in Unterabschnitt 3.6.2 bestimmten Latenz der translatorischen

Achse und einer zusätzlichen Latenzkorrektur von 25 ms, die durch den verwendeten Beschleunigungssensor hervorgerufen wird. Die Daten jeder Messung werden mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt und aus den fünf Messungen der Mittelwert der Fourier-Transformierten $Y_T(\Omega)$ berechnet. Die Schätzung der Beschreibungsfunktion erfolgt mittels einer H_1 Schätzung [87], welche definiert ist als

$$H_1 = \frac{G_{xy}(\Omega)}{G_{xx}(\Omega)} \quad (3.29)$$

mit der Autoleistungsdichte der Eingangsbeschleunigung $G_{xx}(\Omega)$ und der Kreuzleistungsdichte $G_{yx}(\Omega)$, die sich aus der Ein- und Ausgangsbeschleunigung berechnet. Die Autoleistungsdichte berechnet sich aus der Fourier-Transformierten der Eingangsbeschleunigung $X_T(\Omega)$ und ist definiert als

$$G_{xx}(\Omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \{X_T^*(\Omega)X_T(\Omega)\} \quad (3.30)$$

wobei $X_T^*(\Omega)$ die konjugiert Komplexe zu $X_T(\Omega)$ ist und T die Dauer. Die Kreuzleistungsdichte ist definiert als

$$G_{xy}(\Omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \{X_T^*(\Omega)Y_T(\Omega)\}, \quad (3.31)$$

mit der Fourier-Transformierten der Ausgangsbeschleunigung $Y_T(\Omega)$. Um zudem ein Maß für den Zusammenhang zwischen der Eingangs- und Ausgangsbeschleunigung zu erhalten, wird die Kohärenz entsprechend

$$C_{xy} = \frac{|G_{xy}(\Omega)|^2}{G_{xx}(\Omega)G_{yy}(\Omega)} \quad (3.32)$$

berechnet mit der Autoleistungsdichte $G_{yy}(\Omega)$ der Ausgangsbeschleunigungen.

Bild 3.14 zeigt das Übertragungsverhalten resultierend aus den Messreihen 1 bis 3. Zunächst zeigt sich, dass das verwendete Antriebssystem in der Lage ist den gesamte Untersuchungsbereich darzustellen. Die Kohärenz liegt im Bereich zwischen 0 Hz bis 40 Hz fast durchgängig nahe 1, was für einen geringen Einfluss des Sensorrauschens spricht und auf einen linearen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsbeschleunigung hindeutet. Die Phase weist mehrere Stellen mit Absenkungen und Anstiegen auf, was auf Pol- und Nullstellen im System hindeutet.

Bestätigt wird dies durch eine Betrachtung der Verstärkung. Diese sollte optimalerweise konstant 0 betragen und weicht an mehreren Stellen von diesem Ideal ab. Über einem Wert von 0 kommt es zu einer Verstärkung und unterhalb von 0 zu einer Abschwächung der Anregungsamplitude an der Messstelle. Die erste Polstelle liegt abhängig von der Beschleunigungsamplitude im Bereich zwischen 6,31 Hz und 6,79 Hz und führt zu einer leichten Überhöhung der Amplituden. Weitere Überhöhungen liegen im Bereich 12,62 Hz bis 13,6 Hz, was den ganzzahligen Vielfachen der ersten Überhöhung entspricht. Im Bereich zwischen 6,79 Hz und 12,62 Hz bewirkt eine Überlagerung mehrere Nullstellen und Polstellen eine insgesamt leichte Abschwächung der Amplitude. Eine sehr stark ausgeprägte Abschwächung resultiert aus einer von der Amplitude abhängigen Nullstelle im Bereich von 13,69 Hz bis 14,17 Hz. Am stärksten äußert sich dieser Effekt in der Messung mit der niedrigsten Beschleunigungsamplitude, was gegenüber den anderen Messungen auf ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis oder Nichtlinearitäten zurückzuführen ist. Die deutliche Abnahme der Kohärenz in diesem Bereich bestätigt dies. Der darstellbare Bereich des Simulators beschränkt sich folglich

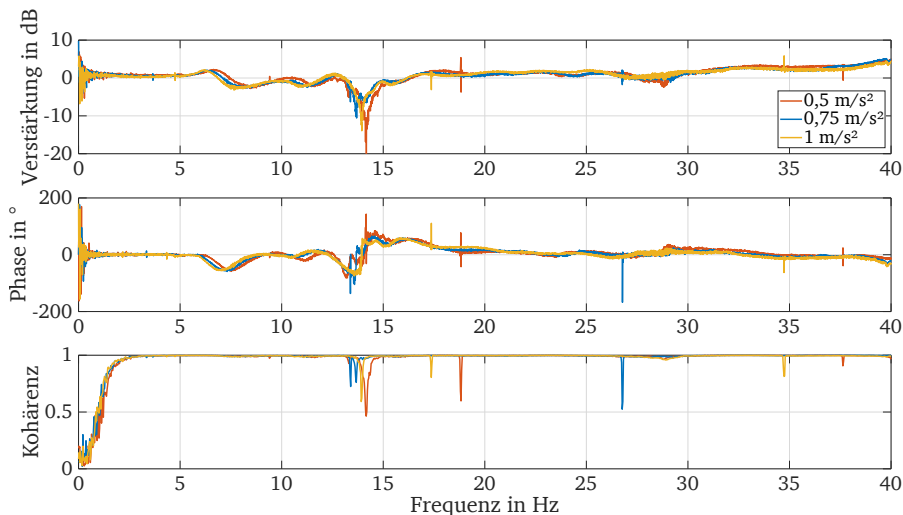


Bild 3.14: Vergleich der Übertragungsverhalten und Kohärenzen des Simulators infolge von translatorischen Sinusschwingungen mit drei verschiedenen Beschleunigungsamplituden

auf Frequenzen unterhalb von 13 Hz. Das nichtideale Übertragungsverhalten im Bereich zwischen 5 Hz und 13 Hz schließt die Untersuchung von Beschleunigungsprofilen mit entsprechenden Frequenzanteilen zwar nicht aus, jedoch müssen die gewonnenen Erkenntnisse im Studiendesign bzw. in der Auswertung des Versuchs in geeigneter Form Berücksichtigung finden.

Gegenüber größeren Simulatoren ist ein Nachteil des vorliegenden Simulators der hohe Anteil der Probandenmasse an der Gesamtmasse des Simulators, der zu einer Veränderung des Übertragungsverhaltens führen kann. Um diesen Einfluss zu analysieren, wird in der vierten Messreihe eine Masse von 60 kg auf dem Sitz fixiert. Bild 3.15 zeigt den Vergleich des resultierenden Übertragungsverhaltens mit den Ergebnissen der zweiten Messreihe. Anhand der Verstärkung sind vorwiegend Änderungen im Bereich der ersten Polstelle und der Abschwächung im Bereich zwischen 6,79 Hz und 12,62 Hz zu erkennen. Die erste Überhöhung teilt sich auf in zwei geringere Überhöhungen, welche die ursprüngliche Überhöhung bei 6,3 Hz flankieren. Als Ursache wird, trotz der Fixierung mittels eines Spanngurts, eine Relativbewegung der auf dem Sitz angebrachten Masse vermu-

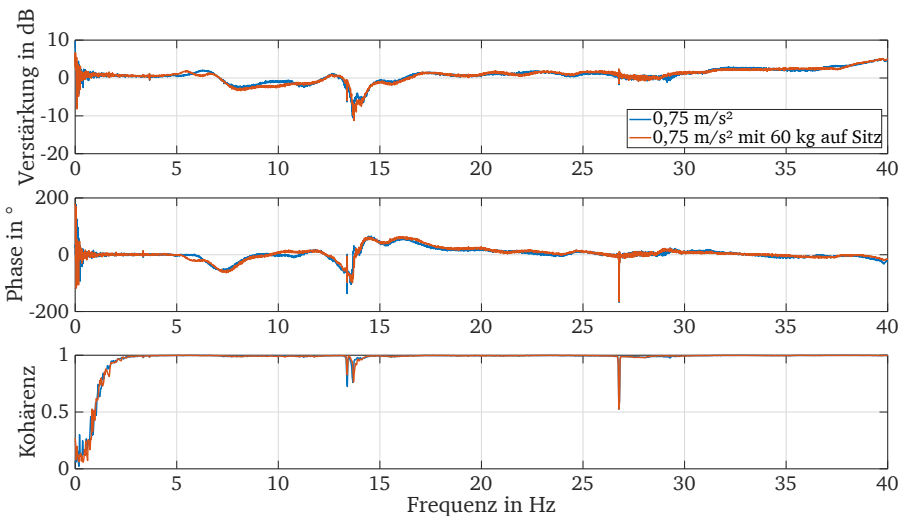


Bild 3.15: Vergleich der Übertragungsverhalten und Kohärenzen des Simulators infolge einer translatorischen Sinusschwingung mit und ohne Zusatzmasse auf dem Sitz

tet. Laut einer Untersuchung von Hagerodt weist die Vergrößerungsfunktion eines vermessenen Sitzes bezogen auf eine Anregung an der Sitzschiene bei Frequenzen zwischen 3,5 Hz und 5,5 Hz den höchsten Verstärkungsfaktor auf. Auch wenn es sich im Simulator um einen anderen Sitz handelt, ist davon auszugehen, dass sich das Übertragsverhalten beider Sitze ähnelt, was die Vermutung bekräftigt [59, S. 41]. Im Bereich zwischen 6,79 Hz und 12,62 Hz nimmt die Abschwächung der Anregungsamplitude leicht zu. Auf die Lage der Nullstelle im Bereich von 13,69 Hz bis 14,17 Hz zeigt die Zusatzmasse keine Auswirkungen. Anhand dieser Ergebnisse wird von einer geringen Veränderung des Übertragungsverhaltens ausgegangen, wenn sich ein Proband in der Fahrgastzelle befindet. Eine unverfälschte Untersuchung der Wahrnehmung ist unterhalb von 5 Hz sichergestellt.

Zur Ermittlung der Ursache der Nullstelle bei etwa 13,5 Hz dienen die fünfte und sechste Untersuchungsreihe. Bild 3.16 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Ergebnissen der zweiten Messreihe. An der besagten Frequenzstelle zeigt sich durch die Masse im Fußraum kaum eine Veränderung. Stattdessen

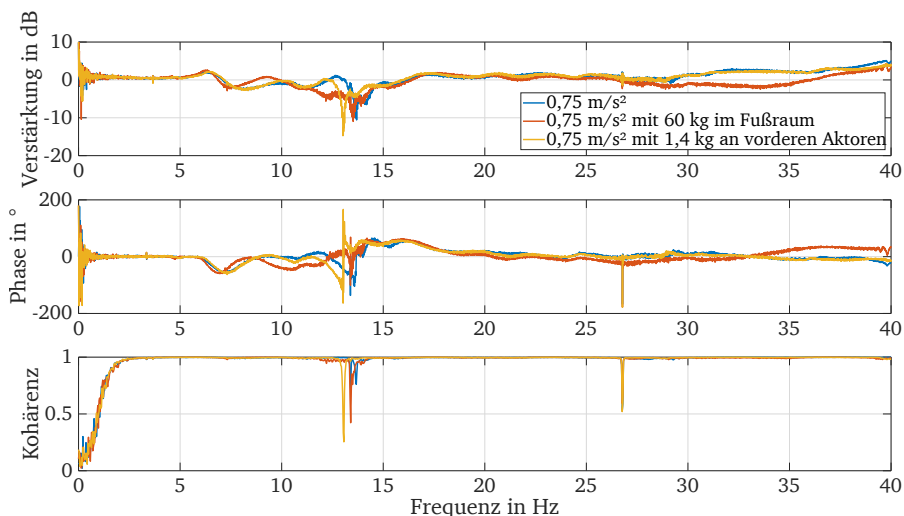


Bild 3.16: Vergleich der Übertragungsverhalten und Kohärenzen des Simulators infolge einer translatorischen Sinusschwingung mit einer Zusatzmasse im Fußraum des Cockpits und mit einer Zusatzmasse an den vorderen Aktoren

führt diese zu einer Abschwächung der Überhöhung bei etwa 12,7 Hz und einer Verschiebung der Übertragungscharakteristik zwischen 7,5 Hz und 12 Hz hin zu niedrigeren Frequenzen. Demzufolge wird in diesem Bereich die Resonanz des verschiebbaren Cockpits vermutet. Die Änderung des Übertragungsverhaltens verdeutlicht, dass trotz der Anbringung durch die Sitzschiene eine Relativbewegung zwischen Cockpit und dem restlichem Aufbau besteht. Um dies zu verhindern ist eine Überarbeitung des Verstellmechanismus erforderlich. Die Zusatzmasse an den vorderen Aktoren führt hingegen zu einer deutlichen Verschiebung der Nullstelle zu niedrigeren Frequenzen. Folglich geraten die vorderen Aktoren aufgrund der Anbringung in Resonanz und zeigen das Verhalten eines Schwingungstilgers. Die Reduktion dieses Effekts erfordert konstruktive Maßnahmen, die entweder den Abstand zwischen dem Aktorschwerpunkt und dem Lagerpunkt verringern oder die Aktormasse am Rahmen der neigbaren Aufbau abstützt. Letztgenanntes gestaltet sich sehr aufwendig, da eine Relativbewegung des Aktors für die Neigung des Aufbaus erforderlich ist. Die Angleichung von Lager- und Schwerpunktlage kann durch die Anbringung einer Gegenmasse oder der Neukonstruktion der Aktoraufnahme erzielt werden.

Neben konstruktiven Änderungen kann für Frequenzen unterhalb der Nullstelle eine Verbesserung durch Entwicklung eines Filters erzielt werden. Insofern dieser das inverse Verhalten der gemessenen Verstärkung aufweist, kann dadurch eine Annäherung an ein ideales Übertragungsverhalten erfolgen. In der vorliegenden Arbeit werden diese Maßnahmen nicht ergriffen. Stattdessen werden in den folgenden Probandenstudien Beschleunigungsprofile mit geringen Frequenzanteilen oberhalb von 5 Hz genutzt.

4 Probandenstudien

Ziel dieses Kapitels ist die Klärung der Forschungsfragen, ob der Simulator und der vorausschauende MCA für das Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens geeignet sind. Vorgestellt werden drei Versuche mit unabhängigen Probandenkollektiven. Die erste Studie dient der Erprobung der optimierten Trajektorien und soll klären, wie sich die Lage des Drehzentrums auf die Realitäts-einschätzung der Simulation auswirkt. Die gewonnenen Erkenntnisse geben Aufschluss darüber, wie der Drehpunkt für weitere Untersuchungen zu platzieren ist. Die zweite Untersuchung soll überprüfen, ob sich die Differenzierbarkeit (relative Wahrnehmungsschwelle) von Beschleunigungsstärken durch die Verwendung der optimierten Trajektorien gegenüber einer rein translatorischen Darstellung verändert. Sollte es zu einem signifikanten Unterschied in der Differenzierbarkeit kommen, wären die Ergebnisse von Simulatorstudien zum Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens nicht ohne Weiteres auf das Realfahrzeug übertragbar. Die dritte Untersuchung besteht aus einem direkten Vergleich von Fahrten im Simulator und im Realfahrzeug. Sie liefert die abschließenden Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit.

Für alle Studien werden im Fahrzeug aufgezeichnete Manöver herangezogen und mit den in Abschnitt 3.5 beschriebenen Methoden für die Darstellung am Simulator aufbereitet. Aufgrund des nicht idealen Übertragungsverhaltens des Simulators oberhalb von 5 Hz werden die Beschleunigungsreferenzen zuvor mit einem Butterworth-Vorwärts-Rückwärts-Tiefpassfilter mit einer effektiven Ordnung von 2 und mit einer Eckfrequenz von 3 Hz gefiltert.

4.1 Einfluss der Drehpunktlage auf die Simulationsgüte

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben entstehen durch Drehzentren, die nicht mit der Kopfposition des Probanden übereinstimmen, parasitäre vestibuläre Beschleunigungen, die sich negativ auf die Simulationsgüte auswirken können. Empirische Evaluationen von Fischer unter Verwendung von Ansätzen basierend auf klassischen MCA zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede in der Einschätzung der

Simulationsgüte durch die Verschiebung der Drehpunktlage entstehen. Es zeigt sich lediglich die Tendenz, dass Drehpunkte auf Kopfhöhe besser bewertet werden [47, S. 128]. Es soll ermittelt werden, ob dies auch für Motion-Cueing-Ansätze mit prädikativem Charakter Bestand hat. Die Ergebnisse der nachfolgenden Studie wurden 2018 im Rahmen einer Konferenz veröffentlicht [40].

4.1.1 Fragestellung und Zielsetzung

Es stellt sich die Frage, ob sich durch Änderung der Drehzentrumslage die Einschätzung der Simulationsgüte eines Fahrers verändert und wo das Drehzentrum idealerweise zu platzieren ist. Durch Klärung dieser Fragestellung wird die Lage des Drehpunktes für die weiteren Untersuchungen festgelegt.

4.1.2 Studienaufbau und Durchführung

Es ist anzumerken, dass diese Studie ein Teil einer zweiteiligen Versuchsreihe ist. Die Ergebnisse des zweiten Teils sind unter Verschluss weshalb nicht auf die Inhalte eingegangen wird. Die Durchführung erfolgte mit alternierender Reihenfolge der beiden Versuchsteile, wodurch eine Beeinflussung des nachfolgend vorgestellten Teils nicht ausgeschlossen werden kann. Die Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt dies. Nachfolgend wird die dargestellte Beschleunigung, der Ablauf des Versuchs und das Probandenkollektiv beschrieben.

Trajektorienerstellung

Als Manöver dient der in Bild 4.1 dargestellte Anfahrvorgang mit anschließender Bremsung in den Stillstand. Dieses wurde mit einer Mercedes-Benz A-Klasse W176 aufgezeichnet. Nach einer Stillstandsphase von etwa 10 s beschleunigt das Fahrzeug mit einer maximalen Beschleunigung von $4,65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ bis etwa $120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und wird danach in den Stillstand abgebremst. Die Dauer des Manövers beträgt etwa 60 s. Die verwendeten Beschränkungen führt Tabelle 4.1 auf. Die Gewichtungsmatrizen werden mit den Werten $\mathbf{R}_{\dot{\theta}} = \text{diag}(100, \dots, 100)$, $\mathbf{R}_{\dot{x}} = \text{diag}(0, \dots, 0)$ und $\mathbf{H} = \text{diag}(1000, \dots, 1000)$ besetzt. Die unteren beiden Verläufe in Bild 4.1 verdeutlichen die starke Ausnutzung des zulässigen Bewegungsraums der neigbaren Plattform mit Werten von etwa 20° und $4 \frac{\circ}{\text{s}}$. Hinsichtlich der Beschleunigungs-

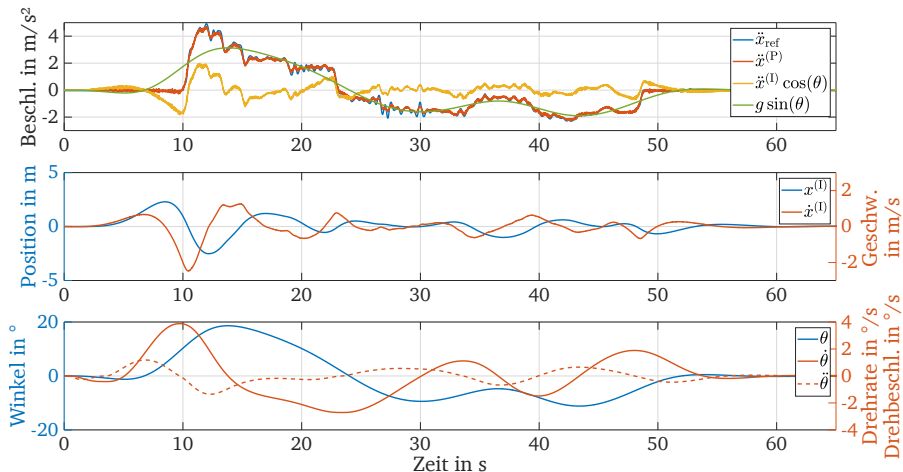


Bild 4.1: Trajektorie für die Untersuchung des Einflusses der Drehpunktlage

stärke und -dauer ist dieses Manöver folglich im darstellbaren Grenzgebiet des Simulators angesiedelt.

Tabelle 4.1: Beschränkungen für die Berechnung der Trajektorien

Parameter	Position	Geschw.	Beschl.	Ruck
Min./Max. Linearbewegung	$\pm 4 \text{ m}$	$\pm 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
Min./Max. Neigungsbewegung	$\pm 20^\circ$	$\pm 4 \frac{^\circ}{\text{s}}$	$\pm 3 \frac{^\circ}{\text{s}^2}$	$\pm 3 \frac{^\circ}{\text{s}^3}$

Definition der Variablen und Hypothesen

Während des Versuches wird lediglich die Lage des Drehzentrums, bezogen auf den Kopf des Fahrers, in der Höhe verändert. Zwei Fahrten werden dabei immer paarweise mit unterschiedlichen Drehzentrumspositionen hintereinander dargestellt (Paarvergleich). Als Referenzdrehzentrum wird ein Wert auf Kopfhöhe des Fahrers (D2) gewählt. Je Paar soll ein Vergleich mit einem Wert 700 mm unterhalb (D1) oder 700 mm oberhalb (D3) des Kopfes durchgeführt werden. Um die Versuchsdauer kurz zu halten, wird im Versuch auf den Vergleich von D1 mit D3

verzichtet. Die unabhängigen Variablen (UV) mit den jeweiligen Faktorstufen sind in Tabelle 4.2 gelistet.

Tabelle 4.2: UV der Untersuchung des Einflusses der Drehzentrumslage

UV	Lage des Drehzentrums
Stufe 1	700 mm unterhalb des Kopfes (D1)
Stufe 2	Drehzentrum auf Kopfhöhe (D2)
Stufe 3	700 mm oberhalb des Kopfes (D3)

Aufgrund der Diskussion zum Einfluss der Drehzentrumslage in Unterabschnitt 2.3 wird vermutet, dass ein höher liegendes Drehzentrum einem darunterliegenden überlegen ist, unabhängig davon, ob dieses im Fahrerkopf liegt. Zudem wird davon ausgegangen, dass es den Probanden schwieriger fällt, ein Drehzentrum oberhalb des Kopfes von einer Lage auf Kopfhöhe zu unterscheiden gemessen, an einem Vergleich zwischen einer Lage unterhalb des Kopfes und einer auf Kopfhöhe. Aus dieser Vermutung abgeleitet, ergeben sich die in Tabelle 4.3 gelisteten Nullhypothese H_0 und Alternativhypothesen H_1 .

Tabelle 4.3: Hypothesen der Untersuchung zum Einfluss der Drehzentrumslage

Kürzel	Hypothese
$H_{0,POR,1}$	Drehzentren unterhalb des Kopfes und auf Kopfhöhe unterscheiden sich nicht in der wahrgenommenen Simulatorgüte
$H_{1,POR,1}$	Drehzentren auf Kopfhöhe erzielen eine bessere wahrgenommene Simulatorgüte als Drehzentren unterhalb des Kopfes
$H_{0,POR,2}$	Drehzentren oberhalb des Kopfes und auf Kopfhöhe unterscheiden sich nicht in der wahrgenommenen Simulatorgüte
$H_{1,POR,2}$	Drehzentren oberhalb des Kopfes erzielen eine bessere wahrgenommene Simulatorgüte als Drehzentren auf Kopfhöhe
$H_{0,POR,3}$	Die Differenzierbarkeit von D1 und D2 unterscheidet sich nicht von der zwischen D2 und D3
$H_{1,POR,3}$	Die Differenzierbarkeit von D1 und D2 ist besser als die von D2 und D3

Versuchsablauf

Die Probanden erfahren nicht, welche Parameter während des Versuchs variiert wird. Die Versuchsbeschreibung teilt ihnen mit, dass sie an einer Untersuchung zu Bewertung unterschiedlicher Beschleunigungskonfigurationen teilnehmen. Vor der Untersuchung füllen die Probanden Fragebögen aus. Diese beinhalten Fragen zur Erfassung demografischer Daten und des Fahrertyps sowie den „Positive and Negative Affect Schedule“ (PANAS) zur Messung der Befindlichkeit [83]. Nachdem die Probanden die Versuchsinstruktionen gelesen und verstanden haben, nehmen Sie im Simulator Platz und stellen unter Anleitung der Versuchsleitung den Sitz, das Cockpit und das HMD ein. Die Sitzeinstellung erfolgt derart, dass sich der Fahrerkopf in Längsrichtung oberhalb des hinteren Aktors befindet. Abschließend wird der vertikale Abstand zwischen dem oberen Anbringungspunkt des hinteren Aktors und der Kopfhöhe vermessen. Daraufhin zieht der Proband die Datenbrille und die Kopfhörer auf. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt die Kommunikation mit dem Probanden durch ein in der Fahrgastzelle angebrachtes Mikrofon und die Kopfhörer. Auf den Kopfhörern wird rosa Rauschen eingespielt, um störende Geräuscheinflüsse zu maskieren, ohne die Gedächtnisleistung zu beeinträchtigen [122]. Die Darstellung eines Manövers startet der Proband selbstständig durch gleichzeitige Betätigung der beiden Schaltwippen des Lenkradmoduls. Zur Eingewöhnung werden zuerst drei Beschleunigungsmanöver mit Drehzentrumslagen auf Kopfhöhe dargestellt. Daraufhin beginnen die Versuchsfahrten. Sowohl die Darstellungsreihenfolge der Paare als auch die Variation des Drehzentrums innerhalb eines Paares erfolgt randomisiert. Jedes Paar wird vier Mal dargestellt, sodass die Probanden am Ende des Versuchs jeweils 16 Beschleunigungsmanöver erlebt haben. Nach jedem Paarvergleich erfolgt eine dreistufige Befragung:

1. Haben Sie einen Unterschied zwischen den beiden Fahrten wahrgenommen?
2. Wenn ja, wie beschreiben Sie den Unterschied?
3. Welche Fahrt fanden Sie realistischer?

Für die erste und dritte Frage wird ein Antwortformat vorgegeben (Forced-Choice-Fragetechnik [98, S. 49]). Die erste Frage müssen die Probanden mit einem Ja

oder Nein beantworten, im Falle der dritten Frage kommt die Option, hinzu keine Aussage abzugeben. Insgesamt verbringt der Proband im Schnitt eine Zeit von etwa 35 Minuten im Simulator. Inklusiv der abschließend auszufüllenden Fragebögen ergibt sich eine Gesamtversuchsdauer von etwa 60 Minuten.

Probandenkollektiv

An der Untersuchung sollten insgesamt 20 Probanden teilnehmen. Der Versuch wurde jedoch nach fünfzehn Teilnehmern abgebrochen, da mit fünf Ausfällen aufgrund von Simulatorkrankheit die Ausfallrate vorheriger Studien deutlich überstiegen wurde. Die Auswertung erfolgt somit anhand der Daten von zehn Probanden, darunter fünf weibliche, mit einem durchschnittlichen Alter von 24 ± 3 Jahren. Fünf der Teilnehmer geben an, Vorerfahrung mit dynamischen Fahrsimulatoren zu besitzen.

4.1.3 Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund der geringen Probandenanzahl beschränkt sich die Auswertung auf eine deskriptive Statistik. Zuerst soll jedoch auf die hohe Ausfallrate, welche auf verschiedene Faktoren zurückgeführt wird, eingegangen werden. Als Erstes zu nennen ist die Durchführung in Kombination mit einem weiteren Versuch. Die Reihenfolge der Versuche wurde alterniert, weshalb die Hälfte der Probanden sich bereits zuvor 40 Minuten im Simulator aufgehalten haben. Dies ist jedoch lediglich für zwei der fünf Ausfälle der Fall. Rücksprachen mit den Probanden ergaben, dass v. a. die wiederholte Darstellung der sehr hohen Beschleunigung zu Unwohlsein geführt hat. Weiterhin wurden störende Faktoren während der Simulation genannt. Dazu zählen Inkongruenzen zwischen der wahrgenommenen Bewegung und den auftretenden Geräuschen und Vibrationen sowie die Luftqualität in der Fahrgastzelle. Im Bezug auf das Sichtsystem erwähnten die Probanden das Tragen des HMD, die Bildqualität und Bildsprünge. Hinzu kommt vermutlich der nicht bewusst wahrgenommene Effekt, dass aufgrund der Überlagerung des Neigungswinkels mit einer starken horizontalen Beschleunigung der virtuelle Gravitationsvektor kurzzeitig variiert, was sich für einige Fahrer unnatürlich anfühlt (vgl. Abschnitt 2.2 bzw. Bild 2.4). Für die weiteren Untersuchungen wird daher geschlussfolgert, dass niedrigere Beschleunigungen dargestellt werden müssen.

Zudem erfolgte im Anschluss an die Untersuchung eine Überarbeitung der Kabinenbelüftung.

Die Ergebnisse sind in Bild 4.2 dargestellt. Das erste Säulendiagramm zeigt die Häufigkeiten, mit denen die erste Frage, ob ein Unterschied zwischen den beiden Manövern wahrnehmbar ist, bejaht oder verneint wird. Das ausgewogene Verhältnis der Antworten veranschaulicht, dass eine Unterscheidbarkeit aufgrund der unterschiedlichen Drehzentren nicht offensichtlich ist. Das mittlere Säulendiagramm gibt die Beantwortung der dritten Frage wieder, welcher Drehpunkt als realistischer eingeschätzt wird, insofern zuvor ein Unterschied festgestellt wurde. Die Ergebnisse der beiden Paarvergleichskonfigurationen (D1 vs. D2) und (D2 vs. D3) unterscheiden sich qualitativ kaum. In beiden Fällen zeigt sich die Tendenz, dass der jeweils höher liegende Drehpunkt besser bewertet wird. Im Falle des Vergleichs von D1 und D2 ist dies leicht stärker ausgeprägt. Zur Vollständigkeit zeigt das dritte Diagramm die Beantwortung die Ergebnisse wenn Probanden zuvor angaben keinen Unterschied gespürt zu haben. Erwartungsgemäß ist der Antwortenanteil „keiner Aussage“ sehr hoch und aus den weiteren Antwortoptionen keine Tendenz zu erkennen. Auf Grundlage der schwierigen Differenzierbarkeit wird es als nicht notwendig erachtet, für die weiteren Untersuchungen die Kopfhöhe jedes Probanden zu vermessen und die Drehzentrumslage anhand des-

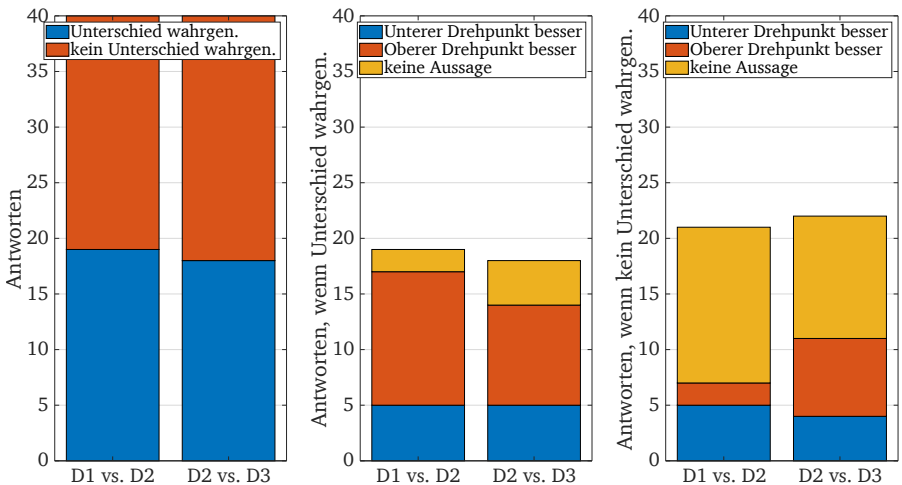


Bild 4.2: Ergebnisse des Versuchs zum Einfluss der Drehpunktlage

sen anzupassen. Da dennoch leichte Vorteile in einem höher liegenden Drehpunkt zu erkennen sind, wird für alle Probanden eine Drehzentrumshöhe von $r = 1$ m verwendet.

4.2 Einfluss der Tilt-Coordination auf die Differenzierbarkeit der Beschleunigung

Diese Studie besteht aus zwei Wahrnehmungsschwellenuntersuchungen, die sich durch die Darstellung der Beschleunigung unterscheiden. Der Vergleich der beiden Untersuchungsergebnisse zeigt, ob durch die unterschiedlichen Darstellungsformen ein Unterschied in der Differenzierbarkeit der Beschleunigungsstärke entsteht.

4.2.1 Fragestellung und Zielsetzung

In Abschnitt 3.5 wurden zwei verschiedene Methoden vorgestellt, um mit einer aufgezeichnete Beschleunigung $\ddot{x}_{\text{ref}}^{(V)}$ Trajektorien für den Simulator zu berechnen. Die in Unterabschnitt 3.5.1 vorgestellte Methode zur Nachbildung des Lastwechselmanövers gibt die Längsbeschleunigung, wie im Fahrzeug, durch reine Horizontalbewegungen wieder. Es wird daher angenommen, dass sich die Wahrnehmung der Längsbeschleunigung im Simulator und im Fahrzeug nicht unterscheidet, wenn die Trajektorie mit dieser Methode dargestellt wird. Im Gegensatz dazu nutzt der optimierungsbasierte, vorausschauende MCA (vgl. Unterabschnitt 3.5.2) die Tilt-Coordination, d. h. Beschleunigungsanteile werden durch Neigung nachgebildet. Überdies nutzt diese Form des MCA die bereits diskutierte gegenseitigen Kompensation der Beschleunigungsanteile der Horizontalbewegung und der Tilt-Coordination. Es stellt sich die Frage, ob diese Abweichungen von einer rein horizontalen Darstellung zu einer veränderten Wahrnehmung der Längsbeschleunigung führen. Wäre dies der Fall, so wäre ein mit dem vorausschauendem MCA erhaltenes Testergebnis nicht uneingeschränkt auf eine reale Fahrt übertragbar.

Als Maß für die Veränderung der Wahrnehmung wird die Differenzierbarkeit der Beschleunigungsstärke herangezogen. Dementsprechend wird dieses Kriterium für das Erleben und Beurteilen der Längsbeschleunigung mittels vorausschauender MCA als notwendige Bedingung angesehen.

4.2.2 Studienaufbau und Durchführung

Die beiden im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen werden nachfolgend als U_x und U_θ bezeichnet.

Trajektorienerstellung

In Untersuchung U_x werden die Beschleunigungen durch reine Horizontalbewegung mit der in Unterabschnitt 3.5.1 beschriebenen Methode dargestellt. Dementsprechend wird ein nachgebildetes Lastwechselmanöver als Beschleunigungsprofil verwendet. Untersuchung U_θ verwendet die in Unterabschnitt 3.5.2 beschriebene Optimierung. Die wahrgenommene Beschleunigung ergibt sich somit aus einer Kombination von Horizontalbewegungen und Tilt-Coordination. Tabelle 4.4 gibt die verwendeten Beschränkungen an. Die Drehrate und Drehbeschleunigung sind gegenüber den Werten des vorherigen Versuchs leicht erhöht, um einen größeren Beschleunigungsanteil der kurzen Zugphase durch die Neigung darzustellen. Die Gewichtungsmatrizen werden mit den Werten $R_\theta = \text{diag}(0, \dots, 0)$, $R_{\dot{x}} = \text{diag}(100, \dots, 100)$ und $H = \text{diag}(1000, \dots, 1000)$ besetzt.

Tabelle 4.4: Beschränkungen für die Berechnung der Trajektorien

Parameter	Position	Geschw.	Beschl.	Ruck
Min./Max. Linearbewegung	± 5 m	$\pm 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 100 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
Min./Max. Neigungsbewegung	± 20 °	$\pm 5 \frac{\circ}{\text{s}}$	$\pm 5 \frac{\circ}{\text{s}^2}$	$\pm 3 \frac{\circ}{\text{s}^3}$

Zum Vergleich der Trajektorien der beiden Untersuchungen sind in den Bildern 4.3 und 4.4 die generierten Lastwechselmanöver, jeweils mit der Standardreizstärke, dargestellt. Der Maximalwert der Sollbeschleunigungen beträgt in beiden Fällen $2,9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Bild 4.4 zeigt zudem die aus Translation und der Neigung resultierenden Beschleunigungsanteile. Der Anteil der Neigung beträgt maximal $0,52 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und wird mit einer Drehrate zwischen $-3,6 \frac{\circ}{\text{s}}$ und $3 \frac{\circ}{\text{s}}$ erreicht. Die Drehbeschleunigungen liegen innerhalb eines Bereichs von $-3,9 \frac{\circ}{\text{s}^2}$ bis $3,05 \frac{\circ}{\text{s}^2}$. Die Tilt-Coordination reduziert den linearen Bewegungsbereich von $-0,98$ m bis $1,98$ m um $1,97$ m auf $-0,85$ m bis 0 m. Die Geschwindigkeit verringert sich von $1,63 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf $0,94 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Anhand dieser Reduktionen bei gleichbleibender Beschleunigungsstärke wird das Potential des vorausschauenden Ansatzes, gerade

für Bewegungssysteme mit wenig Arbeitsraum, deutlich. Zudem ist anzumerken, dass die Endposition des Bewegungssystems der Anfangsposition entspricht und sich somit gegenüber dem rein horizontal dargestellten Lastwechsel der Vorteil ergibt, dass eine beliebig häufige sequentielle Darstellung des Manövers möglich ist.

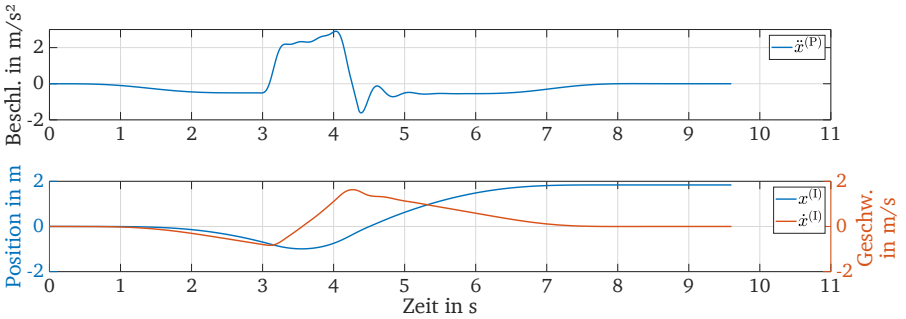


Bild 4.3: Trajektoria zur Darstellung des Lastwechselmanövers durch reine Horizontalbewegung für Untersuchung U_x

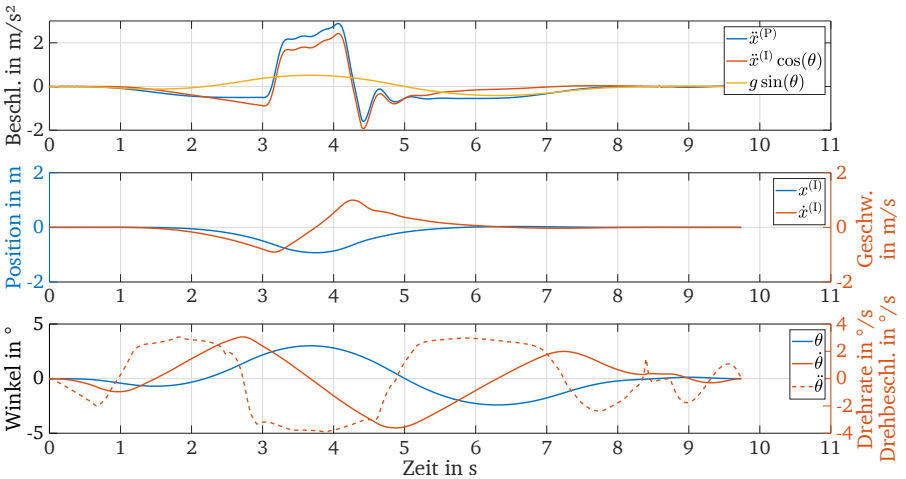


Bild 4.4: Trajektoria zur Darstellung des Lastwechselmanövers mittels optimierungsbasiertem, vorausschauendem MCA für Untersuchung U_θ

Für die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle ist es notwendig die Beschleunigungsstärke in beiden Untersuchungen zu variieren. Die Variation erfolgt durch Multiplikation des Gesamtmanövers bzw. der Trajektorien mit einem veränderlichen Skalierungsfaktor. Dementsprechend geht mit der Änderung der maximalen Beschleunigung auch eine Änderung des Beschleunigungsgradienten einher.

Definition der Variablen und Hypothesen

Im Fokus dieser Untersuchung steht der Einfluss der beiden Darstellungsformen des Lastwechselmanövers auf die Wahrnehmungsschwelle. Zudem wird die Reihenfolge, mit der die Untersuchungen U_x und U_θ durchgeführt werden, alterniert. Dies ermöglicht es, zu beobachten, ob Ermüdungserscheinung oder Lerneffekte die Wahrnehmungsschwelle der an zweiter Stelle durchgeführten Untersuchung beeinflussen. Die resultierenden unabhängigen Variablen mit den jeweiligen Faktorstufen sind in Tabelle 4.5 gelistet. Die abhängige Variable ist die relative Wahrnehmungsschwelle der Probanden.

Tabelle 4.5: UV der Untersuchung zum Einfluss der Tilt-Coordination

UV	Beschleunigungsdarstellung	Untersuchungsreihenfolge
Stufe 1	Nachbildung Lastwechsel (ohne Tilt-Coordination)	Erst U_x , dann U_θ
Stufe 2	Optimierte Trajektorie (mit Tilt-Coordination)	Erst U_θ , dann U_x

Tabelle 4.6 listet die Hypothesen auf. Es besteht die Vermutung, dass die Tilt-Coordination unbewusst wahrnehmbar ist und zu einer Änderung der Wahrnehmungsschwelle führt. Zudem wird vermutete, dass die an zweiter Stelle durchgeführte Untersuchung aufgrund der genannten Effekte andere Ergebnisse erzielt als die vorherige.

Versuchsablauf

Nach Ausfüllung von Fragebögen (Abfrage Demographie, Fahrertyp, PANAS) und dem Lesen der Instruktionen beginnt der Versuch im Simulator. Die Probanden tragen das HMD sowie Kopfhörer, auf denen rosa Rauschen wiedergegeben wird.

Tabelle 4.6: Hypothesen der Wahrnehmungsschwellenuntersuchung

Kürzel	Hypothese
$H_{0,TH,1}$	Die veränderte Beschleunigungsdarstellung hat keine Auswirkung auf die Wahrnehmungsschwelle
$H_{1,TH,1}$	Die veränderte Beschleunigungsdarstellung verändert die Wahrnehmungsschwelle
$H_{0,TH,2}$	Die Untersuchungsreihenfolge hat keine Auswirkung auf die Wahrnehmungsschwelle
$H_{1,TH,2}$	Die Untersuchungsreihenfolge hat eine Auswirkung auf die Wahrnehmungsschwelle

Das virtuelle Fahrzeug bewegt sich konstant mit $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und stellt die aus dem Lastwechsel resultierende Geschwindigkeitsänderung synchron dar. Für die Antastung an die relative Wahrnehmungsschwelle wird die „weighted Up-Down Method“ von Kaernbach verwendet [75]. Diese stellt eine einfache Variante der adaptiven Verfahren dar: Der Proband muss nach der Darstellung eines Lastwechselpaares entscheiden, welche der beiden Beschleunigungen stärker ist. Ist die Antwort korrekt, wird die Differenz der Beschleunigungsstärke des nächsten Paares verringert (Down-Step). Innerhalb eines Paares bleibt die Beschleunigungsstärke des sogenannte Standardreiz dabei unverändert, wohingegen der Vergleichsreiz nach jedem Paarvergleich adaptiv um eine definierte Schrittweite angepasst wird. Im Falle einer falschen Antwort, erfolgt eine Vergrößerung des Unterschieds zwischen Standard- und Vergleichsreiz (Up-Step), die jedoch ein Vielfaches der Verringerung ist. Das Verhältnis zwischen der Vergrößerung und der Verringerung wird im vorliegenden Fall auf $\frac{\dot{x}_{down}}{\dot{x}_{up}} = \frac{1}{3}$ festgelegt. Die Annäherung an die Wahrnehmungsschwelle erfolgt mit einer Schrittweite von $0,087 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Diese Schrittweite wird nach der Hälfte der 30 Testschrittpaare um die Hälfte reduziert. Der Standardreiz beträgt $2,9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und der erste Startreiz $2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Die Festlegung dieser Werte erfolgte auf Grundlage von Vorerfahrungen aus zuvor durchgeführten Wahrnehmungsschwellenuntersuchungen. Der Proband initiiert die Ausführung eines Lastwechselsmanövers durch kurzes Betätigen des Fahrpedals. Im Fall der rein translatorischen Lastwechseldarstellung in Versuch U_x bewegt sich der Schlitten um etwa 2 m voran (vgl. Bild 4.3). Daher wird das Bewegungssystem nach der Darstellung eines Paares automatisch und unterhalb der Wahrnehmungsschwelle in die Neutrallage zurückgesetzt. Dieser 15 sekündige Vorgang ist während der Untersuchung U_θ nicht notwendig. Stattdessen ist aus Gründen der Vergleichbarkeit eine gleichlan-

ge Stillstandsphase vorgesehen. In diesen beiden Phasen kann der Proband kein neues Manöver initiieren. Sobald dies erneut möglich ist, zeigt das Navigationsgerät eine entsprechende Nachricht an. Die Antwortabgabe tätigt der Proband mit den Schaltwippen des Lenkrads. Nach den 30 Manöverpaaren füllen die Probanden abschließend Fragebögen aus. Für die Durchführung einer Untersuchung wird im Schnitt eine Stunde benötigt, wovon ca. 30 Minuten zum Ausfüllen der Fragebögen benötigt werden.

Probandenkollektiv

An der Untersuchung nahmen 28 Personen teil. Aufgrund von Simulatorkrankheit kam es zu einem Ausfall und ein Datensatz wurde unvollständig abgespeichert, sodass die Ergebnisse von 26 Datensätzen vorliegen. Unter den 26 vollständig untersuchten Personen sind 9 weiblich Probandinnen. Der Altersdurchschnitt beträgt 27 ± 3 Jahre.

4.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Da die Fragestellung nicht die exakte Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle erfordert, sondern lediglich als Mittel zum Vergleich der beiden Beschleunigungsdarstellungen dient, wird ein Mittelwert aus den Beschleunigungsdifferenzen jedes Testschritt-paares für jeden Probanden gebildet. Der angegebene Wert und die tatsächliche Wahrnehmungsschwelle unterscheiden sich somit leicht, die Grundaussage dieses Versuchs bleibt jedoch erhalten. Tabelle 4.7 zeigt die berechneten Mittelwerte beider Versuche und die zugehörige Standardabweichung. Die Mittelwerte unterscheiden sich nur marginal und die Standardabweichungen sind identisch. Zur Überprüfung, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen besteht, wird ein T-Test für abhängige Stichproben verwendet. Das Signifikanzniveau des Test wird entsprechend der Konvention auf $\alpha = 5\%$ gelegt [114, S. 42]. Als Kennzahl wird das beobachtete Signifikanzniveau (p-Wert) angegeben. Das beobachtete Signifikanzniveau beschreibt hierbei die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des beobachteten oder eines extremeren Stichprobenergebnisses unter der Annahme, dass die Nullhypothese gilt [16, S. 107]. Dementsprechend widerlegt ein p-Wert unterhalb des Signifikanzniveaus die Nullhypothese und deutet einen signifikanten Unterschied in den Ergebnissen der beiden Testumgebungen an. Das Ergebnis fällt mit $p = 0,56$ nicht signifikant aus und spricht

für die Gültigkeit der Nullhypothese $H_{0,TH,1}$, d. h. die Änderung der Beschleunigungsdarstellung hat in dieser Versuchsreihe keinen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle. Ein T-Test zur Überprüfung der Hypothese $H_{1,TH,2}$

Tabelle 4.7: Mittelwert und Standardabweichung der Untersuchungen U_θ und U_x

Beschl. Darstellung	Mittelwert	Standardabw.
U_θ (mit Tilt-Coordination)	0,234	0,054
U_x (nur Translation)	0,241	0,054

(unabhängige Stichproben) fällt ebenfalls nicht signifikant aus ($p = 0,21$). Die Reihenfolge hatte in der vorliegenden Untersuchung keinen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmungsschwelle.

Dieses Ergebnis ist essentiell für weitere Untersuchungen. Da die zwei Darstellungsformen im Simulator zu keiner Änderung der Differenzierbarkeit der Beschleunigungsstärke führen, wird davon ausgegangen, dass die Übertragbarkeit absoluter Aussagen möglich sind. Um dies zu überprüfen, werden in der nächsten Studie die Beurteilungen von Manövern im Simulator und im Fahrzeug miteinander verglichen.

4.3 Erleben und Beurteilen der Längsdynamik im Fahrsimulator

Im Folgenden wird eine Studie beschrieben, bei der Probanden als Beifahrer einen Vergleich zwischen Fahrten im Fahrzeug und im Simulator durchführen. Dabei handelt es sich um eine Validierung des Simulators bzw. der vorausschauenden MCA. Anzumerken ist, dass der Begriff der Validierung in der Fahrsimulation nicht klar definiert ist [164, S. 19]. Im Kontext der vorliegenden Arbeit soll er beschreiben, wie gut die längsdynamischen Eigenschaften eines Fahrzeug repliziert werden. Am nächsten kommt dies dem Begriff der physikalischen Validität, der nach Blana die Übereinstimmung hinsichtlich der Fahrzeugdynamik und der Gestalt des Fahrzeugs umfasst [15, S. 10]. Abzugrenzen ist diese von der verhaltensbezogenen Validität, welche die Übereinstimmung des Verhaltens des Fahrers im simulierten und realen Umfeld beschreibt, unabhängig davon, ob die physikalischen Reize übereinstimmen [15, S. 10]. Diese gilt meist als der wichtigere Aspekt, da ein vergleichbares Verhalten des Fahrers der dominierende Indikator für die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist. Dementsprechend befassen sich

die meisten Validierungsstudien mit dem Nachweis verhaltensbezogener Validität. Eine sehr gute Übersicht liefert die Arbeit von Zöller [164, S. 27ff]. Studien, die nicht das Fahrverhalten, sondern wie im vorliegenden Fall die physikalischen Validität in den Fokus stellen, konnten im Zuge einer Literaturrecherche nicht gefunden werden. Als Ursache wird hier v. a. die Notwendigkeit der Skalierung angesehen, wodurch eine physikalische Übereinstimmung mit den Fahrzeugbeschleunigung per se nicht gegeben ist.

4.3.1 Fragestellung und Zielsetzung

Die Validierungsstudie stellt eine Überprüfung dar, ob der Simulator in Kombination mit einem vorausschauenden MCA für das Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens geeignet ist. Dabei bestimmen die Bewegungsdarstellung durch das Bewegungssystem und die restlichen, durch den Simulator erzeugten Reize die Qualität der Simulation. Für die Simulationstechnik liefern die Ergebnisse ein besseres Verständnis von den nach heutigem Stand noch selten verwendeten prädiktiven MCA und erlauben überdies die Ableitung von Anforderungen an das Bewegungssystem bei Verwendung dieser. Im Rahmen der Weiterentwicklung des längsdynamischen Simulators erlauben die Ergebnisse somit auch eine Beleuchtung der Stärken und Schwächen des Bewegungssystems.

4.3.2 Studienaufbau und Durchführung

Dem Probanden werden Anfahrmanöver mit konstanter Fahrpedalstellung (Accelerator Pedal Position (APP)) im Fahrzeug und im Simulator dargestellt, diese sollen von ihm hinsichtlich Beschleunigungsstärke und weiterer Kriterien bewertet werden. Als Fahrzeug steht für diese Untersuchung ein Mercedes-Benz Modell A 200 CDI (Baujahr 2014) zur Verfügung (vgl. Bild 4.5).

Trajektorienerstellung

Als Beschleunigungsreferenz werden drei unterschiedlich starke Anfahrmanöver gewählt, die sich aus einer sprungartigen Erhöhung der Fahrpedalstellung ergeben. Um im Fahrzeug eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der durchgeführten Manöver zu gewährleisten, sind unter dem Fahrpedal, wie in Bild 4.5 dargestellt,



Bild 4.5: Versuchsfahrzeug und Fahrpedalblockierung zur Eingrenzung der Fahrpedalstellung

Blockierungen vorgesehen, die das überschreiten bestimmter Fahrpedalstellungen verhindern. Die Durchführung des Versuchs erfolgt mit einem trainierten Fahrer, der mit möglichst identischem Gradienten das Fahrpedal betätigt. Sobald der dritte Gang erreicht ist, nimmt der Fahrer das Fahrpedal zurück. Die drei Fahrpedalstellungen und die resultierenden Beschleunigungsreferenzen sind in Bild 4.6 dargestellt. Die mit den drei Blockierungen zulässigen, maximalen Fahrpe-

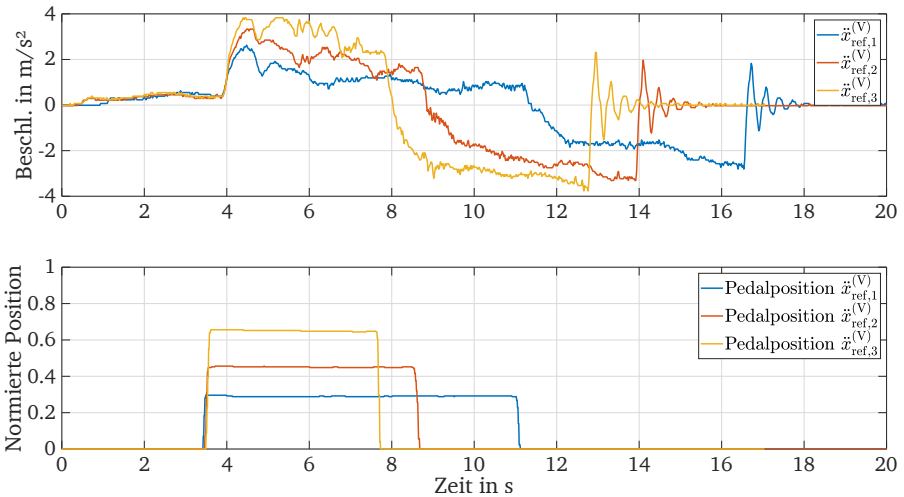


Bild 4.6: Variation der Fahrpedalstellung und resultierenden Beschleunigungen

darstellungen liegen bei etwa 31 %, 45 % und 67 % des Gesamtstellwegs. Die Wahl dieser Stellungen ergibt sich aus der Anforderung ausreichend abgestufte Beschleunigungen zu erzielen und dennoch eine unskalierte Darstellbarkeit am Simulator zu erlauben. Zu diesem Zweck flossen die Erkenntnisse der beiden vorherigen Untersuchungen in das Studiendesign ein. Demnach sollen die maximale Beschleunigung unter $4,65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und die Unterschiede in der Beschleunigungsstärke deutlich oberhalb von $0,241 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ liegen, um Simulatorkrankheit zu vermeiden und eine gute Differenzierbarkeit zu gewährleisten. Die erreichten maximalen Beschleunigungen betragen $\ddot{x}_{\text{max},1}^{(P)} = 2,50 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $\ddot{x}_{\text{max},2}^{(P)} = 3,28 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ und $\ddot{x}_{\text{max},3}^{(P)} = 3,89 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Aus einer Literaturzusammenstellung von Müller zu alltäglich genutzten Längsbeschleunigungen im Fahrzeug geht hervor, dass die gängigen Werte im Bereich von $1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ bis $3,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ liegen [101, S. 102]. Die in dieser Studie erreichten Beschleunigungen werden dementsprechend als ausreichend hoch angesehen.

Anhand von Bild 4.6 ist zu erkennen, dass sich die Manöver in die vier Phasen Kriechen, Beschleunigen, Bremsen und Stillstand unterteilen lassen. In der Kriechphase löst der Fahrer die Bremse und das Fahrzeug rollt für etwa 3 s bis 4 s. Die Beschleunigungsphase umfasst den Teil der Fahrpedalbetätigung gefolgt von der Bremsphase, in der der Fahrer das Bremspedal betätigt. Sobald die Verzögerung sich betragsmäßig auf 0 reduziert, beginnt der Stillstand, welcher eine abklingende Oszillation der Beschleunigung aufgrund der Aufbauschwungung beinhaltet.

Zur Darstellung der Beschleunigungen im Simulator wurden aus den drei gezeigten Manövern mittels Optimierung die Trajektorien berechnet. Erste Tests zeigten, dass die unskalierte Nachbildung der Bremsphase zu einer deutlich zu starken Wahrnehmung der Verzögerungen führte. Da eine Beeinflussung der Bewertung der Beschleunigungsphase nicht auszuschließen ist, wird die Stärke der negativen Beschleunigungsanteile reduziert. Zwar widerspricht dies dem Grundgedanken, die Beschleunigungen unskaliert darzustellen. Jedoch liegt der Fokus auf der Untersuchung der positiven Beschleunigungsanteile. Zudem könnten sich hierin Aussagen von Stratulat bestätigen, dass starke Verzögerungen durch Tilt-Coordination dargestellt, zu intensiv wahrgenommen werden [138, 140]. Iterativ wurde für alle Verzögerungsanteile ein Skalierungsfaktor von 0,6 ermittelt, mit welchem im Simulator ein realistischer subjektiver Fahreindruck vermittelt wird.

Die an den Optimierungsalgorithmus übergebenen Beschränkungen sind in Tabelle 4.8 aufgelistet. Im Vergleich zur Optimierung des Lastwechsels sind diese im Bezug auf die Drehrate und Drehbeschleunigung etwas konservativer gewählt. Die Gewichtungsmatrizen werden mit den Werten $\mathbf{R}_{\ddot{g}} = \text{diag}(100, \dots, 100)$,

Tabelle 4.8: Beschränkungen für die Berechnung der Trajektorien

Parameter	Position	Geschw.	Beschl.	Ruck
Min./Max. Linearbewegung	$\pm 4,6$ m	$\pm 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 100 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
Min./Max. Neigungsbewegung	$\pm 20^\circ$	$\pm 3,5 \frac{^\circ}{\text{s}}$	$\pm 4 \frac{^\circ}{\text{s}^2}$	$\pm 2 \frac{^\circ}{\text{s}^3}$

$\mathbf{R}_x = \text{diag}(0, \dots, 0)$ und $\mathbf{H} = \text{diag}(1000, \dots, 1000)$ besetzt. Die generierten Trajektorien zur Darstellung der drei Manöver sind in den Bildern 4.7, 4.8 und 4.9 zu sehen. Die Vorkonditionierung des Bewegungssystems findet während der Kriech-

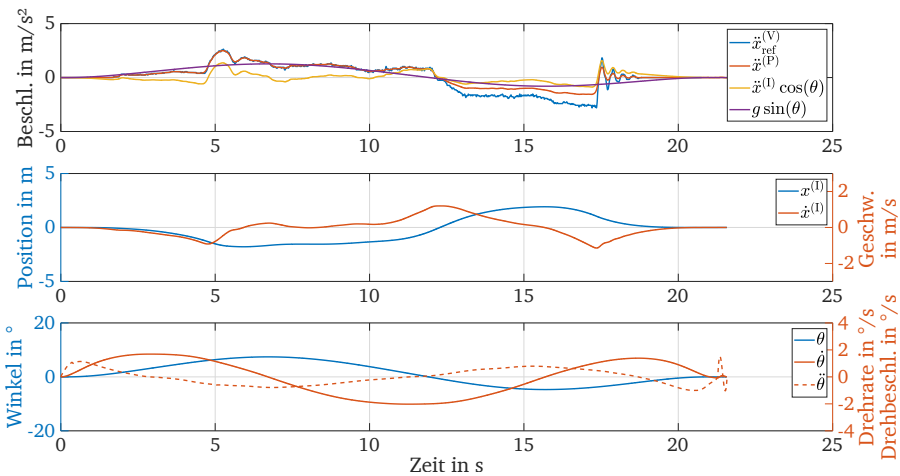


Bild 4.7: Optimierungsergebnis des Beschleunigungsmanövers mit 31 % Fahrpedalstellung

phase (etwa von 0 bis 5 s) statt. Gegenüber einer Beschleunigung aus dem Stillstand wird durch die leichte Maskierung des Kriechens eine höhere Akzeptanz auftretender Geräusche und Vibrationen erhofft. Die vestibuläre Beschleunigung, welche aus den Anteilen der Translation und Tilt-Coordination resultiert, weist gegenüber der Referenzbeschleunigung weniger hochfrequente Anteile auf und in der Abbremsphase ein um den Skalierungsfaktor reduziertes Niveau. Die horizontalen und rotativen Bewegungen der drei Manöver ähneln sich größtenteils qualitativ und werden hin zum stärksten Manöver ausgeprägter. Das stärkste Manöver weist zu Beginn einen Unterschied zu den anderen auf. Die Drehrate

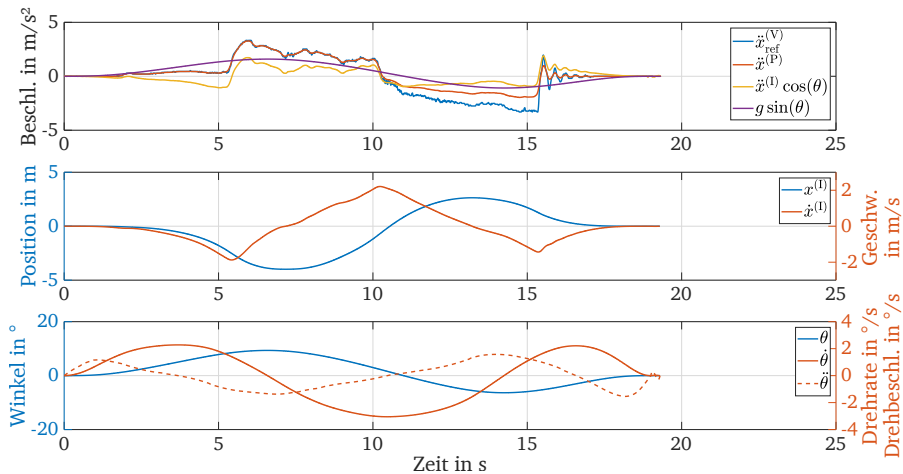


Bild 4.8: Optimierungsergebnis des Beschleunigungsmanövers mit 45 % Fahrpedalstellung

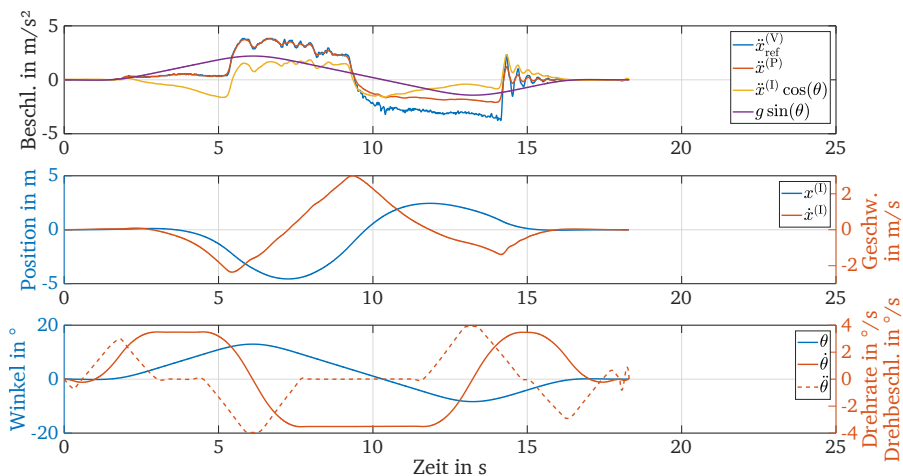


Bild 4.9: Optimierungsergebnis des Beschleunigungsmanövers mit 67 % Fahrpedalstellung

bzw. -beschleunigung ist kurzzeitig negativ, was durch eine Vorwärtsbewegung des Schlittens kompensiert wird. Dies ist notwendig, da der Schlitten darauffolgend bis zur negativen Beschränkung von $-4,6$ m zurück bewegt wird. Insgesamt nutzt das dynamischste Manöver einen Großteil des durch die Beschränkung vorgegebenen Arbeitsraums aus.

Definition der Variablen und Hypothesen

Die unabhängigen Variablen dieser Untersuchung sind die Testumgebungen (Fahrzeug und Simulator) und die drei Fahrpedalstellungen bzw. die daraus resultierenden Beschleunigungen (vgl. Tabelle 4.9). Die Reihenfolge, mit der die Manöver dargestellt werden, wird variiert. Dazu werden drei verschiedene Sequenzen verwendet, die dazu dienen, Abhängigkeitseffekte zu vermeiden. Die Befragung

Tabelle 4.9: UV der Validierungsstudie

UV	Testumgebung	Fahrpedalstellung
Stufe 1	Fahrzeug	31 %
Stufe 2	Simulator	45 %
Stufe 3		67 %

untergliedert sich in drei Teile. Die Messgrößen der ersten Befragung legen den Fokus auf die Beurteilung der Beschleunigungsphase des jeweiligen Manövers, um potentielle Unterschiede zwischen den beiden Testumgebungen herauszustellen. Als Orientierung dienten zur Erstellung der Fragen bereits durchgeführte Studien im Bereich der Anfahrvorgang- und Simulatorbewertung ([130, S. 24f], [149, S. A 4]). Da der Proband die Fahrt passiv erlebt, sind eine Vielzahl von Beurteilungsfragen, bspw. zur Anfahrtdosierbarkeit oder Ansprechzeit, nicht zulässig. Die Beurteilung der Beschleunigungsphase beschränkt sich deshalb auf die folgenden vier Fragen, die von einem Beifahrer eingeschätzt werden können und das erlebte zum Ausdruck bringen:

1. Wie stark empfanden Sie die Beschleunigung?
2. Wie komfortabel empfanden Sie die Beschleunigung?
3. Wie ruckartig empfanden Sie den Aufbau der Beschleunigung (erster Beschleunigungsschub)?

-
4. Wie stark empfanden Sie das längsdynamische Ruckeln während der Beschleunigung?

Zur Messung der Antworten werden graduelle Skalen (Likert-Skala) von 1 (sehr schwach; nicht komfortabel; nicht ruckartig) bis 10 (sehr stark; sehr komfortabel; sehr ruckartig) vorgegeben.

Der zweite Befragungsteil bezieht die Bewertung der weiteren Manöverphasen in den Vergleich der Testumgebung mit ein. Vor dem Hintergrund, dass der Beschleunigungsphase eine Kriechphase voran- sowie eine Brems- und Stillstandsphase nachgestellt ist und aufgrund des vorausschauenden Verhaltens im Simulator während dieser Phasen die stärksten Inkongruenzen zu erwarten sind, soll ermittelt werden, wie schwer es Probanden fällt, eine isolierte Beurteilung der Beschleunigungsphase vorzunehmen. Sollte sich dies in den beiden Testumgebungen unterscheiden, wird ein Einfluss durch die Geräusche und Vibrationen des Bewegungssystems vermutet. Aufgrund dessen sollen diese vom Probanden in beiden Testumgebungen eingeschätzt werden:

5. Wie stark haben die Kriech-, Brems- und Stillstandsphase Ihre Bewertung der Beschleunigungsphase beeinflusst?
6. Wie laut wurden Geräusche neben dem Rauschen wahrgenommen?
7. Wie stark wurden Vibrationen wahrgenommen?

Die Beantwortung soll wie zuvor anhand einer Skala von 1 (sehr schwach) bis 10 (sehr stark) erfolgen (vgl. Anhang B). Zudem sollen die Probanden aus der wahrgenommenen Stärke eine Rangreihenfolge von 1 (am schwächsten) bis 4 (am stärksten) für die Manöverphasen erstellen. Somit wird nicht nur die Lautstärke bzw. Stärke der NVH-Phänomene gemessen, sondern auch, ob diese in den beiden Testumgebungen im gleichen Verhältnis, während der vier Phasen, wahrgenommen werden:

8. In welchen Phasen haben Sie Geräusche am stärksten wahrgenommen?
Bewerten Sie die Phasen mit 1 (am schwächsten) bis 4 (am stärksten).
9. In welchen Phasen haben Sie Vibrationen am stärksten wahrgenommen?
Bewerten Sie die Phasen mit 1 (am schwächsten) bis 4 (am stärksten).

Der dritte Teil soll Aufschluss darüber geben, wie die Probanden die Qualität der Manöverdarstellung über der Zeit bewerten. Zu diesem Zweck wird die

im Unterabschnitt 2.4.2 beschriebene Methode zur kontinuierlichen Bewertung angewendet. Als Bewertungsschnittstelle wird der in Bild 4.10 dargestellte Drehknopf und eine Skala in der VR verwendet. Mit dem Drehknopf verschieben die



Bild 4.10: Drehknopf zur kontinuierlichen Bewertung von Inkongruenzen und die entsprechende Skala mit Zeiger als Head-Up-Display des Beifahrers

Probanden während der Fahrt einen als Referenz dienenden Zeiger auf der Skala. Zu Beginn jeder Fahrt befindet sich der Zeiger am linken Rand, was einem Bewertungswert von Null entspricht. Die Probanden werden angewiesen, während der Fahrt eine Bewertung größer Null abzugeben, sobald Inkongruenzen jeglicher Art auftreten. Die Stärke der Bewertung soll dabei von der Intensität der Inkongruenz abhängen. Die Art der Inkongruenz wurde dabei nicht genauer spezifiziert, stattdessen wird der Proband anschließend zu seiner Bewertung befragt. Um beleuchten zu können, welche Faktoren die kontinuierliche Bewertung beeinflusst haben, erhalten die Probanden den in Bild 4.11 gezeigten Fragebogen. Dieser ist in die vier Phasen des Manövers unterteilt und listet Kriterien auf, die auf Basis der vorherigen Studien als Ursache für Inkongruenzen vermutet werden. Da weitere Faktoren nicht ausgeschlossen sind, steht es den Probanden frei, zu den vorgegebenen Kriterien keine Angabe zu machen und stattdessen weitere Faktoren zu benennen. Abschließend sollen die Probanden auf einer Skala von 1 bis 10 angeben, wie sie die Qualität des Beschleunigungsgefühls gegenüber einer realen Fahrt einschätzen.

Bitte geben Sie an, welcher der folgenden Faktoren ihre Bewertung beeinflusst hat					
Faktor	Kriechphase	Beschleunigungsphase	Abbremsphase	Stillstandsphase	
Bewegungswahrnehmung	unnatürlich	unnatürlich	unnatürlich	unnatürlich	
	natürlich	natürlich	natürlich	natürlich	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Stärke der Beschleunigung/ Verzögerung	zu stark	zu stark	zu stark	zu stark	
	zu schwach	zu schwach	zu schwach	zu schwach	
	passend	passend	passend	passend	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Stärke des Ruckelns	zu stark	zu stark	zu stark	zu stark	
	zu schwach	zu schwach	zu schwach	zu schwach	
	passend	passend	passend	passend	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Sichtsimulation	störend	störend	störend	störend	
	nicht störend	nicht störend	nicht störend	nicht störend	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Übereinstim. Sichtsim./ Bewegungssim.	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	
	gut	gut	gut	gut	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Vibrationen	störend	störend	störend	störend	
	nicht störend	nicht störend	nicht störend	nicht störend	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Geräusche	störend	störend	störend	störend	
	nicht störend	nicht störend	nicht störend	nicht störend	
	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	
Weitere Faktoren?					

Während der **Beschleunigungsphase**, wie stufen Sie die Qualität des **Beschleunigungsgefühls** im Vergleich zu realen Beschleunigungen ein?

sehr gering	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	sehr hoch
	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	

Bild 4.11: Fragebogen zur Benennung von Ursachen für Inkongruenzen und zur Angabe der Qualität des Beschleunigungsgefühls

Die zu untersuchenden Hypothesen korrespondieren direkt mit den abhängigen Variablen und sind in Tabelle 4.10 aufgelistet. Es besteht die Annahme einer veränderten Beschleunigungsbewertung im Fahrsimulator. Es wird zudem von einer stärkeren Präsenz von Vibrationen und Geräuschen im Fahrsimulator ausgegangen, die zu einer beeinträchtigten Beurteilung der Beschleunigungsphase führen.

Tabelle 4.10: Hypothesen der Validierung des Fahrsimulators

Kürzel	Hypothese
$H_{0,V,1}$	Die Testumgebung hat keine Auswirkung auf die Wahrnehmung der Beschleunigungsphase
$H_{1,V,1}$	Die Testumgebung verändert die Wahrnehmung der Beschleunigung
$H_{0,V,2}$	Die Vibrationen und Geräusche der Testumgebung haben keine Auswirkung auf die Beurteilung der Beschleunigungsphase
$H_{1,V,2}$	Die Vibrationen und Geräusche im Fahrsimulator führen zu einer veränderten Beurteilung der Beschleunigungsphase

Versuchsablauf

Der Versuch unterteilt sich in sechs Schritte, die nachfolgend anhand von Bild 4.12 erläutert werden. Nachdem die Probanden im ersten Schritt Fragebögen (Abfrage, Demographie, Fahrertyp, PANAS) ausgefüllt und die Instruktionen gelesen haben, erfolgt im Simulator die Einstellung des Sitzes und eine Erläuterung, wie das HMD und die Kopfhörer aufzuziehen sind. Daraufhin beginnt der Versuch im Fahrzeug. Die Probanden nehmen auf dem Beifahrersitz Platz und erhalten den Fragebogen mit den Fragen 1. bis 9., um sich diesen vor der ersten Fahrt einzuprägen. In beiden Testumgebungen tragen die Probanden während einer Fahrt Noise-Cancelling-Kopfhörer, auf denen ein Rosa Rauschen abgespielt wird. Nachdem im Fahrzeug vier Fahrten einer Beschleunigungsstärke abgeschlossen sind, füllen die Probanden den zuvor erhaltenen Fragebogen aus (2. und 3. Schritt in Bild 4.12). Daraufhin wechseln die Probanden in den Simulator und erleben dort die korrespondierende Fahrt. Den Probanden ist zu diesem Zeitpunkt bekannt, wie die Datenbrille und die Kopfhörer aufzuziehen sind, sodass dieser Vorgang zügig durchgeführt wird. Im Schnitt vergingen so vom Ende der Fahrten im Fahrzeug bis zum Beginn der Fahrten im Simulator fünf Minuten. Im Simulator erfolgen insgesamt acht Fahrten (4. Schritt). Die ersten vier dienen,

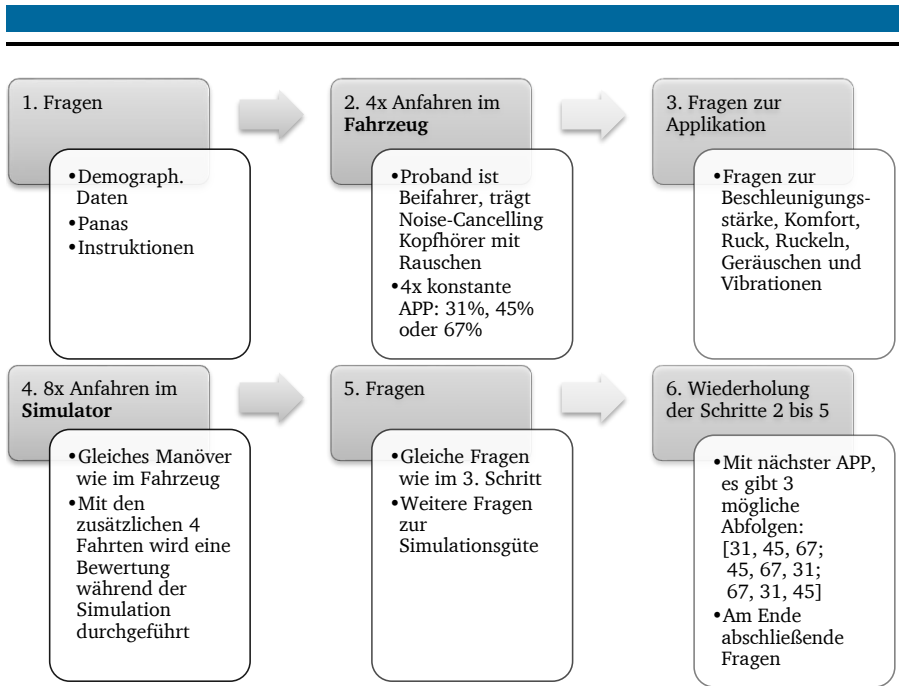


Bild 4.12: Versuchsablauf der Validierungsstudie

analog zu den Fahrten im Fahrzeug, der Beantwortung der Fragen 1. bis 9.. Während der darauffolgenden vier Fahrten betätigen die Probanden den Drehkopf zur kontinuierlichen Bewertung der Simulationsgüte. Dazu werden sie vor der ersten Verwendung dazu instruiert, Unstimmigkeiten jeglicher Art durch einen Ausschlag des Cursors zum roten Bereich zu markieren. Nach Beendigung aller acht Fahrten werden den Probanden nochmals die Fragen 1. bis 9. ausgehändigt und der in Bild 4.11 dargestellte Fragebogen (5. Schritt). Anschließend erfolgt eine Wiederholung der Schritte 2. bis 5. mit einer weiteren Beschleunigungsstärke. Nach der dritten Wiederholung sind die Versuchsfahrten beendet. Zuletzt füllt der Proband abschließende Fragebögen (SSQ, Simulationsgütebewertung) aus.

Probandenkollektiv

An der Studie nahmen 26 Probanden teil. Während des Versuchs gab es einen Ausfall aufgrund von Simulatorkrankheit. Ein weiterer Proband führte den Versuch

vollständig durch, gab jedoch verglichen zu anderen Bewertungen eine sehr hohe SSQ-Punktezahl an, sodass seine Bewertungen ebenfalls aufgrund von Simulatorkrankheit nicht berücksichtigt wurden. Ausgeschlossen von der Auswertung wurde zudem ein Proband aufgrund einer schlechten Korrelation zwischen der Beschleunigungsbewertung und der auftretenden Beschleunigung im Fahrzeug. Somit stehen zur Auswertung 23 Datensätze zur Verfügung, darunter vier von weiblichen Probandinnen. Der Altersdurchschnitt des ausgewerteten Kollektivs beträgt (24 ± 2) Jahre. Sieben Teilnehmer waren bereits mit einem dynamischen Fahrzeugsimulator vertraut.

4.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Vor der Analyse der Ergebnisse gilt es zu überprüfen, ob die im Simulator dargestellten Beschleunigungen denen im Fahrzeug entsprechen. Vor jeder Versuchsdurchführung wurde das Versuchsfahrzeug auf eine einheitliche Betriebstemperatur gebracht. Dennoch konnte nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Beschleunigungen zwischen den Versuchsfahrten leicht unterscheiden. Ursachen sind witterungsbedingte Änderungen der Bodenhaftungen, die Außentemperaturen und leichte Unterschiede bei der Betätigung des Fahrpedals. Zum Abgleich der Beschleunigungsprofile dienen die Bilder 4.13, 4.14 und 4.15. Diese zeigen einer Überlagerung der im Fahrzeug aufgezeichneten Beschleunigungen mit der im Simulator erlebten Beschleunigung. Zudem dargestellt ist ein Profil welches sich aus der Mittelung der einzelnen Fahrzeugbeschleunigungen ergibt.

Die Verläufe der im Fahrzeug aufgezeichneten Signale verdeutlichen, dass trotz einer einheitlichen Betätigung des Fahrpedals eine geringe Streuung besteht. Der Vergleich der gemittelten Fahrzeugbeschleunigung mit einer im Simulator aufgezeichneten Beschleunigung zeigt einen überwiegend deckungsgleichen Verlauf. Im Falle des schwächsten Manövers liegt, am Punkt der maximalen Beschleunigung, die im Simulator wahrnehmbare Beschleunigung etwas oberhalb des gemittelten Verlaufs. Im Falle des stärksten Manövers verhält es sich umgekehrt, wohingegen das Manöver mittlere Stärke nahezu exakt das gemittelte Niveau erreicht. Aufgrund dieser Betrachtung wird in der Auswertung von einer ausreichend hohen quantitativen Übereinstimmung zwischen den Beschleunigungen des Simulators und des Fahrzeugs ausgegangen.

Die Auswertung der Fragebögen erfolgt zuerst mittels eines Vergleichs der Antworten zu den Fragen 1. bis 9.. Die Anwendung eines zweiseitigen Wilcoxon-

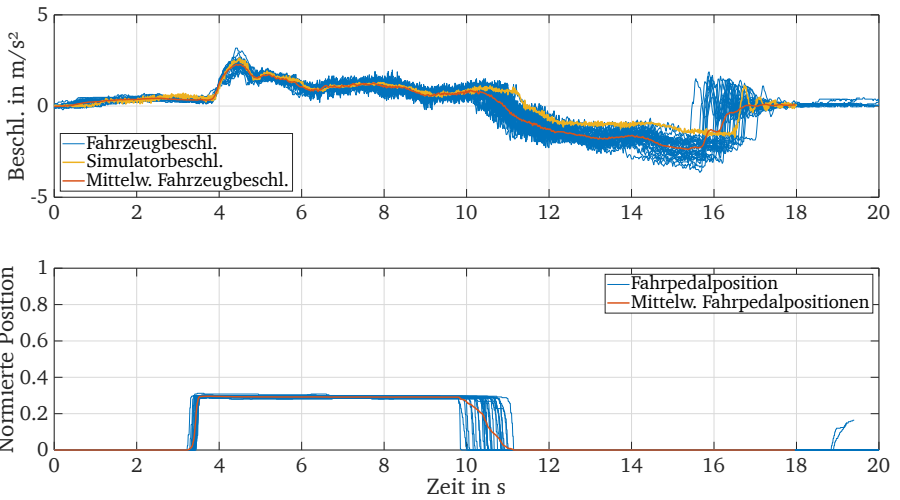


Bild 4.13: Mittelung aller durchgeführte Versuchsfahrten und Vergleich mit der im Simulator dargestellten Beschleunigung für die Fahrpedalstellung 31%

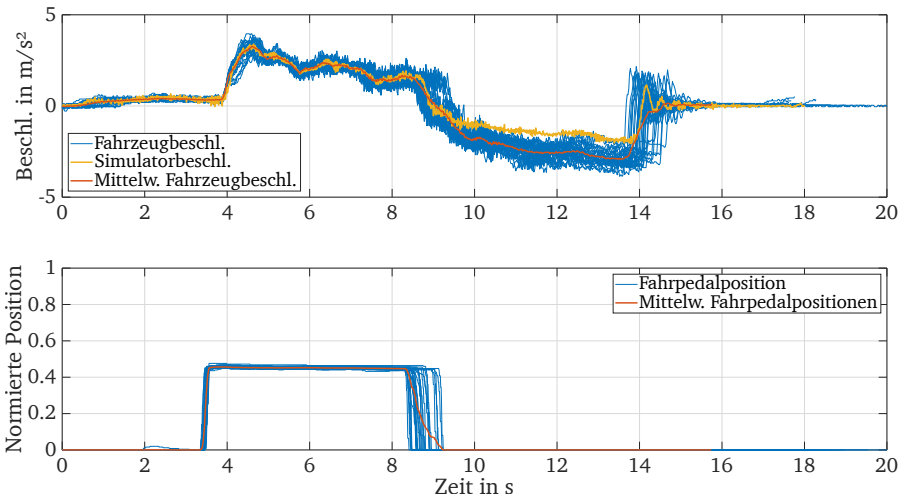


Bild 4.14: Mittelung aller durchgeführte Versuchsfahrten und Vergleich mit der im Simulator dargestellten Beschleunigung für die Fahrpedalstellung 45%

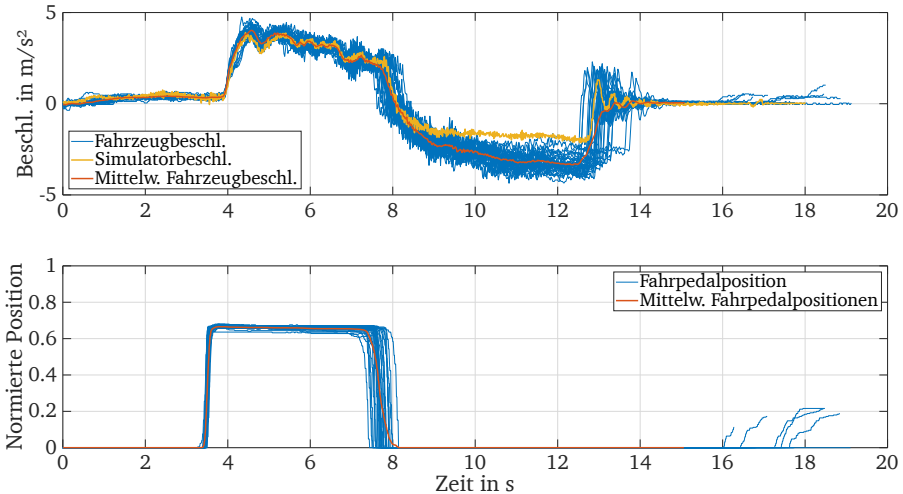


Bild 4.15: Mittelung aller durchgeführte Versuchsfahrten und Vergleich mit der im Simulator dargestellten Beschleunigung für die Fahrpedalstellung 67%

Tests liefert Aufschluss darüber, ob signifikante Unterschiede in den Bewertungen vorliegen. Wie zuvor wird ein beobachtetes Signifikanzniveau bestimmt und ein Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ festgelegt, unterhalb dessen von einem signifikantem Unterschied ausgegangen wird. Da ein Wert oberhalb dieser Grenze noch kein Beleg für die Korrektheit der Nullhypothese ist, wird willkürlich eine Schwelle von 50% festgelegt, ab der von ausreichender Übereinstimmung ausgegangen wird.

Tabelle 4.11 listet die zu bewertenden Kriterien und die Resultate der jeweiligen Fahrpedalstellung auf. Rot gefärbte Werte kennzeichnen die Unterschreitung des Signifikanzniveaus von $\alpha = 5\%$. Gelb gefärbte Werte weisen keinen signifikanten Unterschied auf, jedoch erlaubt es das Resultat nicht von einer Übereinstimmung auszugehen. Grüne Werte geben an, dass das beobachtete Signifikanzniveau oberhalb von 50% liegt. Im Folgenden werden die Fragestellungen im einzelnen behandelt.

Tabelle 4.11: Ergebnisse des Wilcoxon-Signifikanztests. Angegeben sind die beobachteten Signifikanzniveaus (p-Wert)

Fragestellung	31 %	45 %	67 %
Wie stark empfanden Sie die Beschleunigung?	0,36	0,22	0,06
Wie komfortabel empfanden Sie die Beschleunigung?	0,78e-5	0,10	0,54e-5
Wie ruckartig empfanden Sie den Aufbau der Beschleunigung (erster Beschleunigungsschub)?	0,19e-5	0,89	0,31
Wie stark empfanden Sie das Ruckeln während der Beschleunigung?	0,11	0,26	0,002
Wie stark haben die Kriech-/Brems-/Stillstandsphase Ihre Bewertung der Beschleunigungsphase beeinflusst?	0,12	0,69	0,79
Wie laut wurden Geräusche neben dem Rauschen wahrgenommen?	0,006	0,001	0,01
Wie stark wurden Vibrationen wahrgenommen?	0,03	0,07	0,28

Bewertung der Beschleunigungsstärke

Der Signifikanztest fällt für alle drei Beschleunigungsstärken negativ aus, d. h. die Bewertungen in den beiden Testumgebungen unterscheiden sich nicht signifikant. Die Abnahme des beobachteten Signifikanzniveaus mit der Beschleunigungsstärke zeigt jedoch, dass eine Tendenz zu signifikanten Unterschieden besteht. Da die Beschleunigungsstärke als wichtigstes Kriterium angesehen wird, erfolgt, neben dem Wilcoxon-Test, die Durchführung einer Rangkorrelation zum Test auf Zusammenhänge zwischen der Bewertung der Beschleunigungsstärke und der tatsächlichen maximalen Beschleunigung. Das Ergebnis im Fahrzeug beträgt $\rho_V = 0,986$ und im Simulator $\rho_S = 0,993$. In beiden Testumgebungen zeigt sich die gleiche Tendenz eines annähernd linearen Zusammenhangs zwischen der max. Beschleunigung eines Manövers und der Stärkeeinschätzung. Visualisiert ist dies im oberen Plot von Bild 4.16. Dort sind über der max. Beschleunigung die Mediane der Stärkebewertung im Fahrzeug und im Simulator aufgetragen. Der untere Teil zeigt die Verteilung der Bewertungen in Form von Box-Plots für beide Testumgebungen. Ein Vergleich der Box-Plots der geringsten Beschleunigungen zeigt, dass der Interquartilsabstand, d. h. der Wertebereich, in dem sich 50 % der Angaben befinden, im Fahr Simulator leicht erhöht ist gegenüber der Bewertung im Fahrzeug. Dies wird auf die tatsächlich Unterschiede in den Beschleunigungsstärken zurückgeführt (vgl. Bild 4.13). Die Ergebnisse der Bewertung der höchsten Beschleuni-

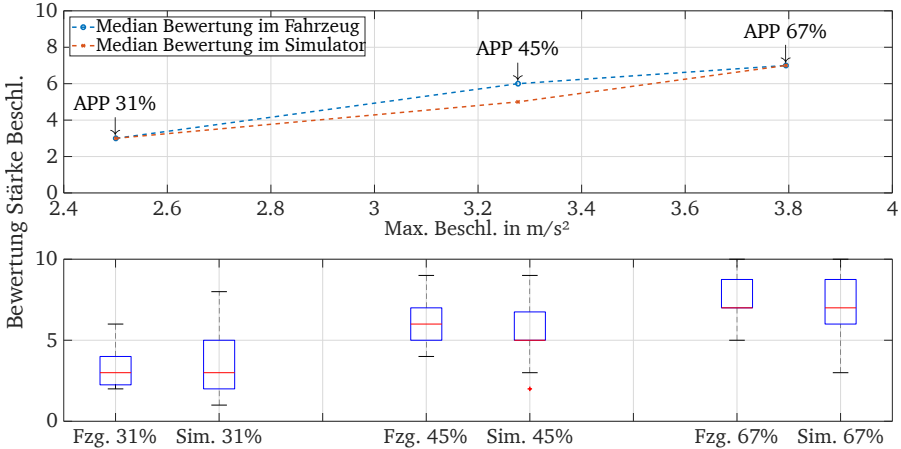


Bild 4.16: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und der Beschleunigungstärkebewertung, von 1 (sehr schwach) bis 10 (sehr stark)

gungsstärke weisen ein umgekehrtes Verhältnis auf. Im Simulator wurden die Beschleunigungen vermehrt leicht schwächer bewertet. Auch dies deckt sich mit den Unterschieden in den Beschleunigungsprofilen (vgl. Bild 4.15). Insgesamt deuten die Resultate darauf hin, dass im Simulator die Beschleunigungseinschätzung wie im Fahrzeug vorgenommen werden kann.

Bewertung des Komforts

Die Resultate zur Komfortbewertung der niedrigsten und der höchsten Fahrpedalstellung deuten auf signifikante Unterschiede zwischen den Testumgebungen hin. Die in Bild 4.17 dargestellten Mediane und Boxplots veranschaulichen dies. Im Simulator wird der Komfort abgesehen von der mittleren Beschleunigung deutlich niedriger bewertet. Das Ergebnis lässt somit zunächst darauf schließen, dass eine Komfortbewertung im Simulator nicht valide durchgeführt werden kann.

Nach Bubb ist der Komfort ein diffuser Begriff [22, S. 146], was durch die unterschiedlichen Sprachgebräuchen, Definitionen und Modellen zum Ausdruck kommt [162, S. 10ff]. Da dieser vor der Versuchsdurchführung nicht genauer spezifiziert wurde, sind bei den Probanden vermutlich verschiedene Kriterien in die

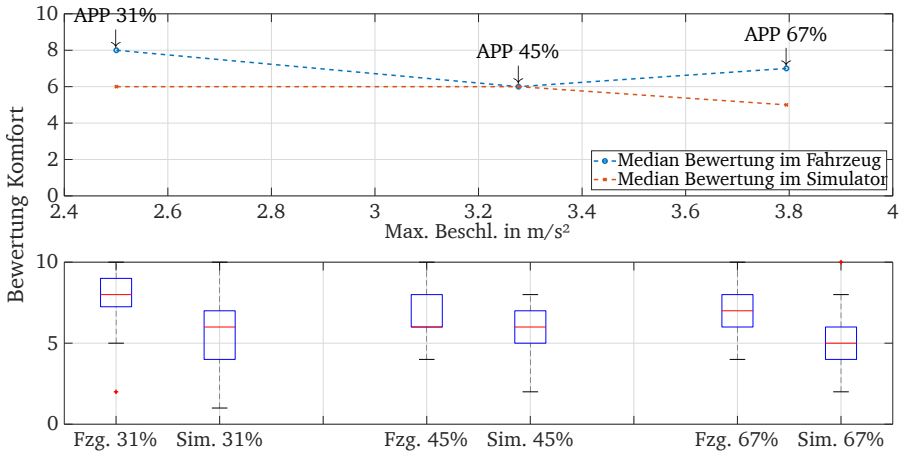


Bild 4.17: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und der Komfortbewertung, von 1 (nicht komfortabel) bis 10 (sehr komfortabel).

Bewertung eingeflossen sind. Einen entscheidenden Einfluss können Schwingungen und Vibrationen haben [92, S. 23]. Im Bereich der Entwicklung der Interieur- und Bedienelemente stehen meist Faktoren wie Ergonomie und Bedienkomfort im Vordergrund [64, S.12, S. 128]. Zudem hängt der Komfortbegriff häufig mit der Ästhetik zusammen, sodass sich bspw. durch das Design eines Fahrzeugsitzes bereits eine Veränderung des Sitzkomforts verursachen lässt [82].

Die Ursachen für die tendenziell niedrigere Bewertung des Komforts im Simulator sind folglich vielfältig. Unter Berücksichtigung des Ästhetikaspekts spielt wahrscheinlich die ungewohnte Umgebung eine tragende Rolle. Dem Probanden ist zu jeder Zeit bewusst, dass er sich nicht in einem realen Fahrzeug befindet, sondern in einer synthetischen Fahrgastzelle. Zudem trägt der Fahrer im Simulator das HMD. Diese kann einen negativen Einfluss durch den Tragekomfort und die Bildqualität hervorrufen. Bestätigt wird dies durch die Auswertung der SSQ-Befragung. Für die Okulomotorik ergibt sich eine Punktezahl von 2,4. Diese ist der höchsten Wert im Vergleich zur Desorientierung (0,9) und Übelkeit (1,9). Weitere Aufschlüsse liefert die Auswertung der nachfolgenden Fragen zum Ruck und zum Ruckeln, welche den durch das Antriebsstrangverhalten entstehenden Komforteindruck prägen, sowie die Bewertung der Vibrationen und Geräusche.

Bewertung des Rucks

Im Bezug auf die Bewertung des Rucks zeigen die beobachteten Signifikanzniveaus in Tabelle 4.11, abgesehen vom Manöver mit der niedrigsten Beschleunigung, keinen signifikanten Unterschied zwischen den Testumgebungen. Im Falle der mittleren Beschleunigungsstärke wird eine Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen erreicht.

Anzunehmen ist, dass mit zunehmender Fahrpedalstellung auch der Ruck zunimmt. Dementsprechend sind die in Bild 4.18 über der Beschleunigung aufgetragenen Bewertungsmediane im Fahrzeug grundsätzlich plausibel. Verwunderlich

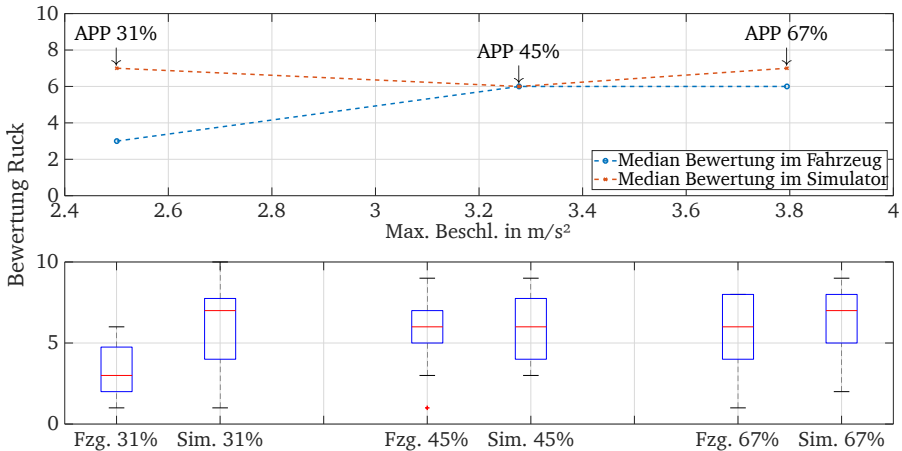


Bild 4.18: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und dem Ruckbewertung, von 1 (nicht ruckartig) bis 10 (sehr ruckartig)

ist, dass im Simulator, im Falle der niedrigsten Beschleunigung, ein Bewertungsniveau vergleichbar mit der höchsten Beschleunigung erreicht wird. Vermutlich ist zur Implementierung der Trajektorien der niedrigsten Beschleunigung ein deutlich zu ruckartiges Manöver ausgewählt worden (vgl. Bild. Berücksichtigt man, dass der Ruck, ein komfortrelevanter Parameter ist, kann dieser einen Einfluss auf die zuvor diskutierte Komfortbewertung haben. Dementsprechend wird vermutet, dass im Fall des niedrigsten Beschleunigungsniveaus die hohe Bewertung des Rucks mit der niedrigen Bewertung des Komforts korreliert. Das Ergebnis lässt lediglich vermuten, dass der Ruck im Simulator valide dargestellt werden kann.

Bewertung des Ruckelns

Die Bewertungen des Ruckelns weisen, abgesehen vom stärksten Manöver, keine signifikanten Unterschiede auf. Die Box-Plots in Bild 4.19 zeigen, dass das Ruckeln im Simulator tendenziell höher bewertet wird. Es wird vermutet, dass im

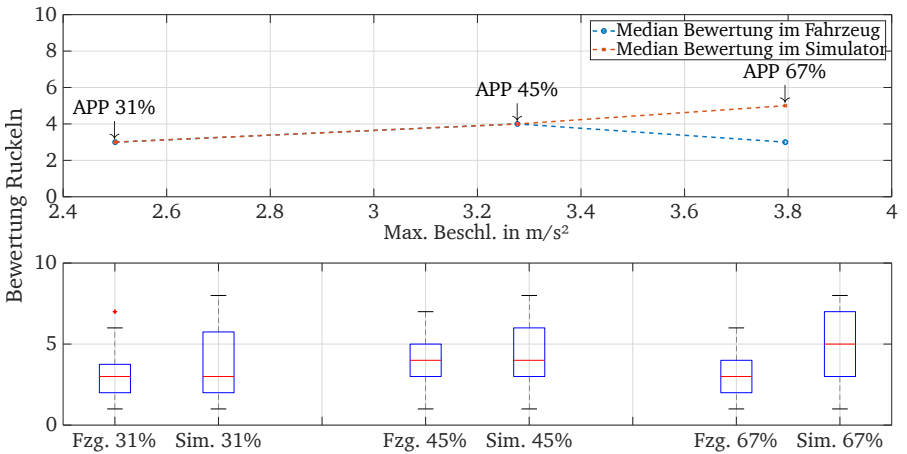


Bild 4.19: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und dem Ruckelbewertung, von 1 (sehr schwach) bis 10 (sehr stark)

Fahrzeug das antriebsstrangerregte Ruckeln durch die fahrbahnerregten Vertikalbewegung des Aufbaus überlagert und maskiert werden. Da der Fahr Simulator die Vertikalbewegung nicht darstellt, rückt das Ruckeln in den Vordergrund und erhält eine höhere Bewertung. Die Ursache für die deutliche Abweichung im Fall der höchsten Beschleunigung wird darauf zurückgeführt, dass der Berechnung der Trajektorien ein Manöver mit zu starkem Ruckeln zu Grunde liegt. Stellt man den Zusammenhang zur Komfortbewertung her, wird zudem vermutet, dass das zu starke Ruckeln eine maßgebende Ursache für die schlechtere Bewertung des Komforts im Simulator ist. Eine verallgemeinerte Aussage, ob das Ruckeln valide nachgebildet werden kann, ist auf Grundlage der Ergebnisse nicht möglich.

Beeinflussung der Beschleunigungsbewertung durch vor- und nachgelagerte Manöverphasen

Die beobachteten Signifikanzniveaus in Tabelle 4.11 deuten auf keine signifikant unterschiedliche Beeinflussung durch die Kriech-, Brems- und Stillstandsphase hin. Im Falle der mittleren und der höchsten Beschleunigung wird sogar eine sehr hohe Übereinstimmung der Bewertungsergebnisse erzielt. Die Medianwerte und Box-Plots in Bild 4.20 zeigt eine insgesamt schwache Beeinflussung durch die peripheren Phasen über alle Beschleunigungsstärken. Es ist ein insgesamt

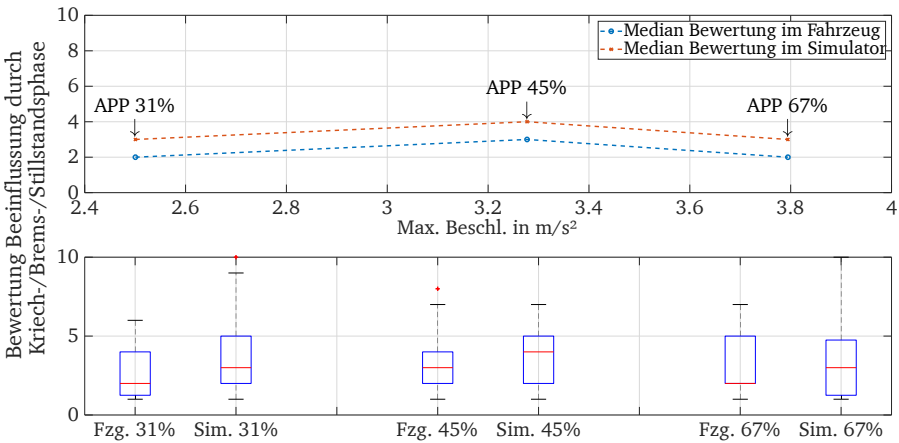


Bild 4.20: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und der Beeinflussungsbewertung, von 1 (sehr schwach) bis 10 (sehr stark)

leicht höheres Beeinflussungsniveau im Fahrsimulator zu erkennen und vereinzelte schlechtere Bewertungen im Simulator. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf die Geräusche und Vibrationen des Bewegungssystems während der Kriechphase. Es wird vermutet, dass sich Probanden von diesen unterschiedlich stark ablenken lassen. Die gesamttheitliche Betrachtung der Resultate zeigt jedoch, dass die meisten Probanden in der Lage, sind sich auf die Bewertung der Beschleunigungsphase zu fokussieren. Daher ist anzunehmen, dass trotz des prädiktiven Verhaltens des MCA eine Bewertung der Beschleunigungsphase wie im Fahrzeug durchführbar ist.

Bewertung der Geräusche und Vibrationen

Aufgrund der ähnlichen Auswirkungen von Geräuschen und Vibrationen auf die Bewegungswahrnehmung werden die Ergebnisse der entsprechenden Bewertungen zusammengefasst diskutiert. Die Bewertung der Geräuschlautstärke liegt im Simulator bei allen Fahrpedalstellungen mit signifikantem Unterschied über dem Bewertungsniveau im Fahrzeug. Im Fall der Vibrationen ist die Wahrnehmung lediglich im Bezug auf das Manöver mit der geringsten Beschleunigung signifikant unterschiedlich. Die Bilder 4.21 und 4.22 geben genaueren Einblick in die Resultate. Die Bewertungen der Geräuschlautstärke steigen in beiden Testumgebungen mit der Beschleunigungsstärke an. Die Bewertungen im Simulator liegen jedoch deutlich oberhalb der im Fahrzeug. Die Vibrationen werden über alle Beschleunigungsstärken gleichermaßen stark bewertet und weisen geringere Unterschiede zwischen den Testumgebungen auf.

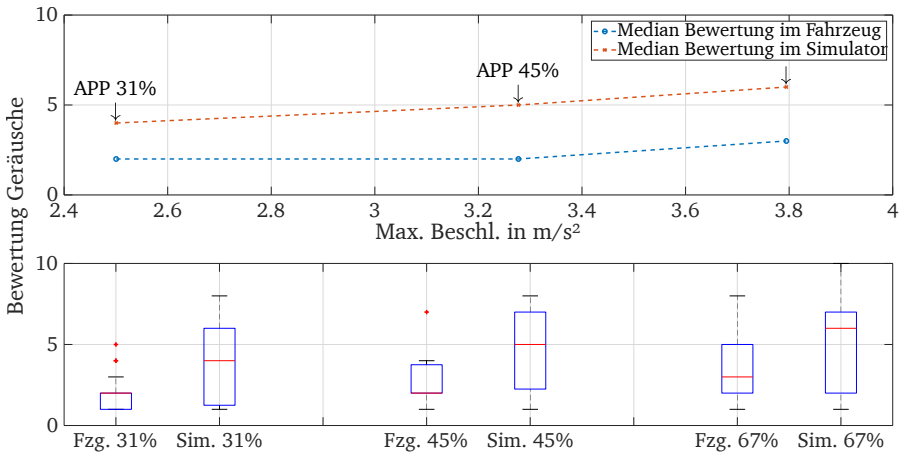


Bild 4.21: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und den Geräuschen, von 1 (sehr schwach) bis 10 (sehr stark)

Als Ursache für Signifikanz werden vor allem die erheblichen Bewegungen des Simulators während der Kriechphase gesehen. Die damit verbundene Inkongruenz zwischen wahrgenommener Beschleunigung und dem NVH-Verhalten ist trotz der Fahrgastzelle und den Noise-Cancelling-Kopfhörer wahrnehmbar und zeigt die wohl größte Schwäche eines prädiktiven Ansatzes in Kombination mit dem

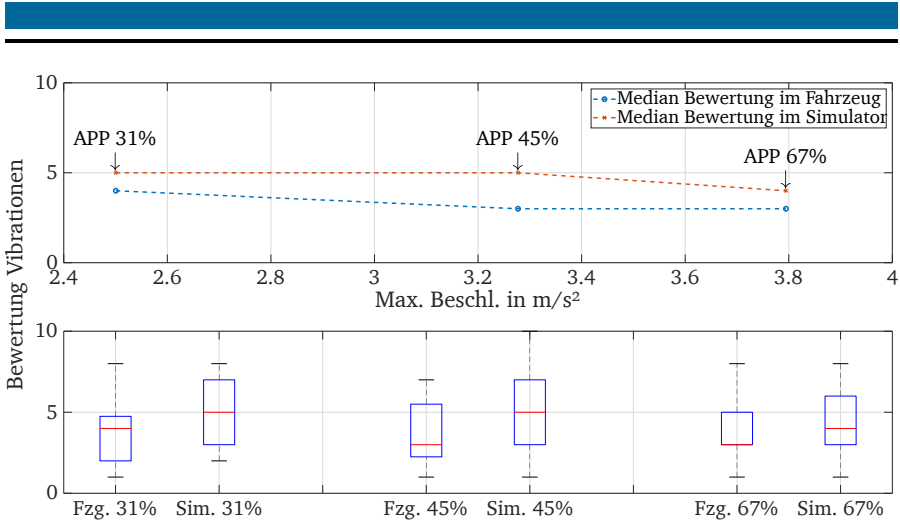


Bild 4.22: Korrelation zwischen maximaler Beschleunigung des Manövers und den Vibrationen, von 1 (sehr schwach) bis 10 (sehr stark)

verwendeten Bewegungssystem. Die Auswertung der Fragen 8. und 9. mit der Aufforderung die einzelnen Phasen nach der Stärke der wahrgenommenen Geräusche bzw. Vibrationen zu bewerten, bestätigt die Vermutung. Die Säulendiagramme 4.24 und 4.23 zeigen die Summen der zu vergebenen Bewertungspunkte über den einzelnen Phasen für alle drei Beschleunigungsstärken. Die Prozentangaben oberhalb der Säulen zeigen die Zuordnung zu der Beschleunigungsstärke an. In beiden Testumgebungen weisen die Punkteverteilungen vergleichbare Tendenzen auf, bspw. dass der Beschleunigungsphase die meisten und der Stillstandphase die wenigsten Punkte zugeordnet werden. Die Betrachtung der Kriechphase zeigt, dass Probanden dieser im Simulator, gegenüber der Bewertung im Fahrzeug, mehr Punkte zugeordnet haben. Die Ergebnisse der Beschleunigungsphase zeigen ein umgekehrtes Bild. Dementsprechend hat eine Umverteilung der zu vergebenen Punkte stattgefunden. Dies spricht für die Vermutung, dass v. a. die während der Kriechphase wahrgenommenen Geräusche und Vibrationen zu einer signifikanten Unterscheidung führen.

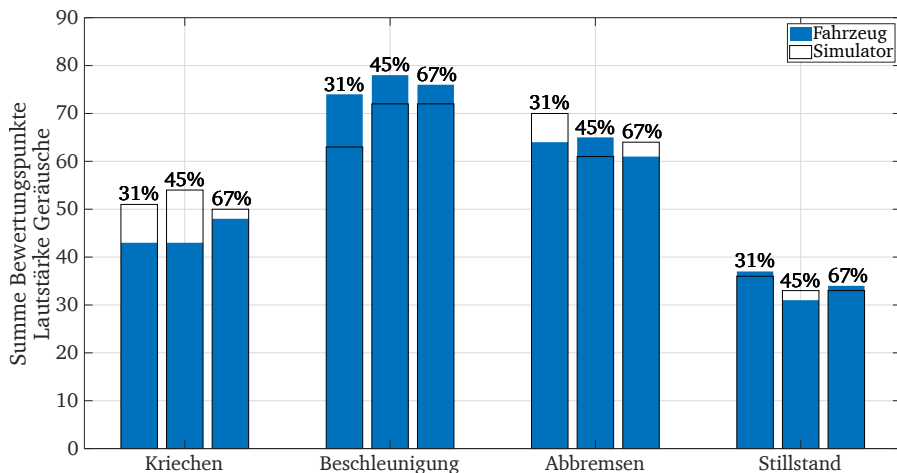


Bild 4.23: Summen der Bewertungspunkte zur Einschätzung der Geräuschpegelverhältnisse während der Manöverphasen

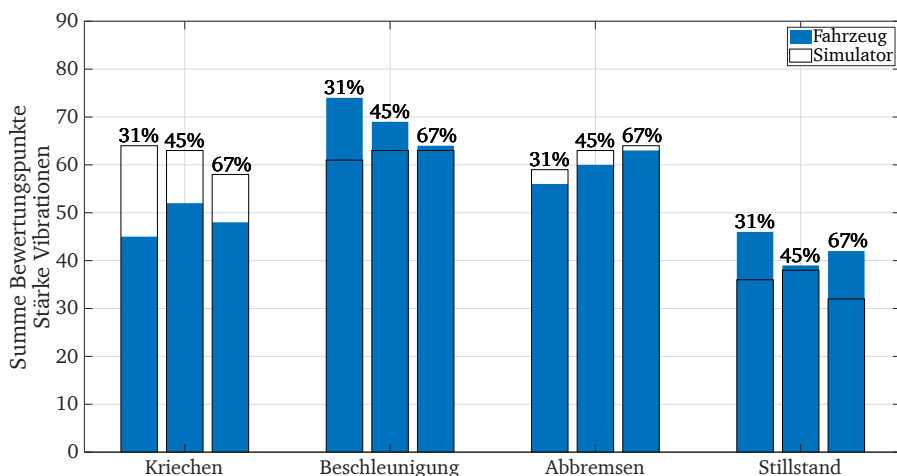


Bild 4.24: Summen der Bewertungspunkte zur Einschätzung der Vibrationsstärkeverhältnisse während der Manöverphasen

Kontinuierliche Bewertung der Bewegungsinkongruenzen und Benennung der Einflussfaktoren

Aus den vier, mit dem Drehknopf erzeugten, kontinuierlichen Bewertungen eines Probanden wurde durch Mittelung eine Bewertung erzeugt und aus dieser, in analoger Weise, eine Gesamtbewertung aus den Daten aller Probanden. Die erhaltenen zeitlichen Bewertungskurven für die drei Beschleunigungsmanöver ergaben keine aufschlussreichen Ergebnisse. Die Ursache liegt in der kurzen Dauer der zu bewertenden Manöver von 14 s bis 18 s. Im Vergleich dazu dauerten die im Grundlagenkapitel (vgl. Unterabschnitt 2.4.2) vorgestellten Fahrten etwa 300 s oder länger. Aufgrund der unterschiedlichen Reaktionszeiten der Probanden konnten somit innerhalb dieser kurzen Dauer keine Manöverbereiche ausfindig gemacht werden, die sich hinsichtlich der Bewegungsinkongruenzen vom Gesamtmanöver absetzen.

Aufschlüsse lieferten stattdessen der Fragebogen zur Benennung von Ursachen für Inkongruenzen. Qualitativ weisen diese für alle drei Beschleunigungsstärken die gleichen Ergebnisse auf. Aus diesem Grund wird lediglich das Resultat zur stärksten Beschleunigung diskutiert. Bild 4.25 zeigt die Ergebnisse. Darin ist zu jedem Faktor des Fragebogens (vgl. Bild 4.11) ein Säulendiagramm mit der Anzahl der gegebenen Antworten dargestellt. Insgesamt wird das Bewegungsverhalten des Simulators während der vier Phasen größtenteils als natürlich wahrgenommen. Am häufigsten als unnatürlich empfinden die Probanden die Kriech- und Abbremsphase, am seltensten als unnatürlich hingegen die im Fokus stehende Beschleunigungsphase. Die Verteilung der Angaben zu Vibrationen und Geräuschen stützen die bereits beschriebene Vermutung, dass diese unnatürliche Wahrnehmung mit dem NVH-Verhalten des Simulators zusammenhängt. Insgesamt überwiegen dennoch die Angaben der Probanden, dass die Vibrationen und Geräusche nicht stören. Die Stärke der Beschleunigung bewerten die Probanden in allen Phasen überwiegend als passend und vereinzelt als zu stark oder zu schwach. Auch als passend wird die Stärke der Abbremsphase angegeben, obwohl diese um 40 % reduziert gegenüber der Realfahrt dargestellt wird. Dies wird als Bestätigung gesehen, dass es notwendig ist, die durch Tilt-Coordination dargestellten Verzögerungen zu skalieren. Die Sichtdarstellung mittels HMD und die Übereinstimmung mit der wahrgenommenen Beschleunigung empfinden die Probanden überwiegend als nicht störend bzw. gut übereinstimmend. Die Phase, in der diese Faktoren als am häufigsten stören bzw. schlecht übereinstimmend angegeben

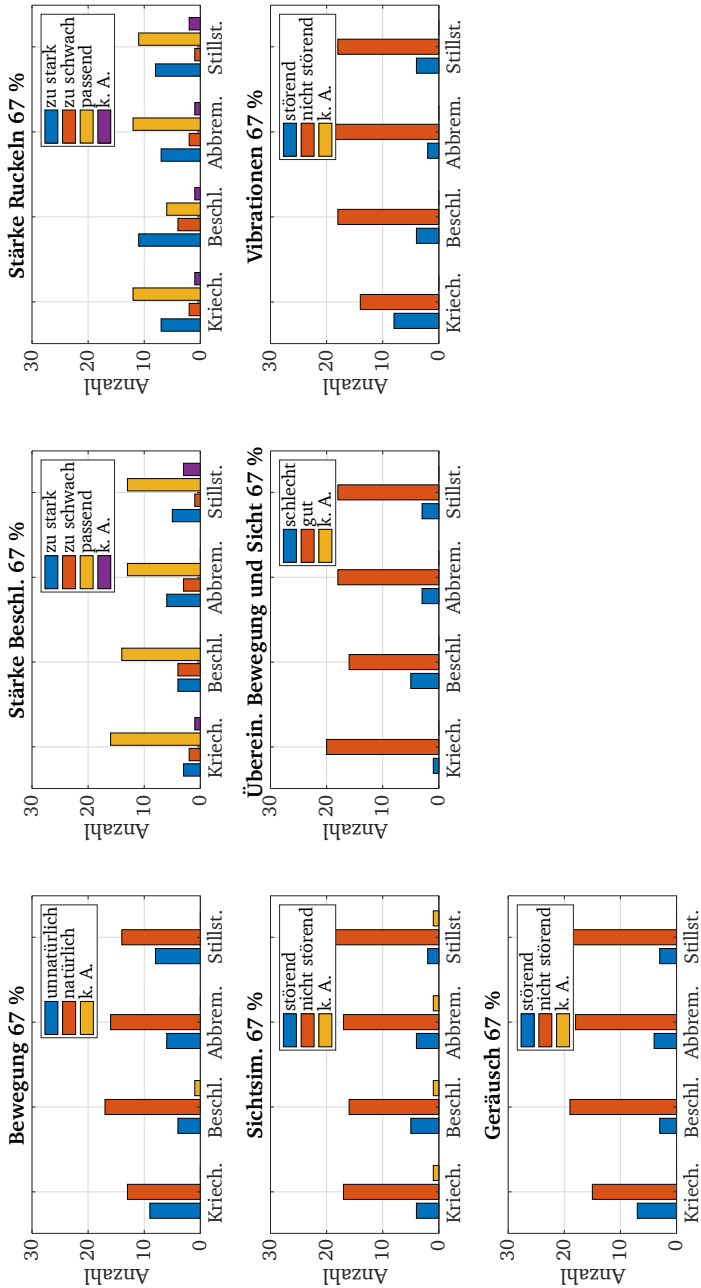


Bild 4.25: Resultate der Benennung der Ursachen für Inkongruenzen

werden, ist die Beschleunigungsphase. Eine Ursache sind Bildsprünge, die bei Verwendung des HMD in Kombination mit sehr hohen Beschleunigungen auftreten. Das Ruckeln wird in allen Phasen meist als passend oder als zu stark angegeben. In der Beschleunigungsphase überwiegen die Angaben, dass dieses zu stark ist, was sich mit dem Ergebnis der Signifikanzanalyse deckt. Weitere, vereinzelt von den Probanden angegebene Ursachen für Inkongruenzen sind die fehlende Vertikaldynamik während der Beschleunigungsphase (zwei Angaben), ein zu starker Ruck beim Übergang in den Stillstand (drei Angaben) und eine wahrnehmbare Rotation während der Kriechphase (drei Angaben).

Die abschließende Frage zum Beschleunigungsgefühl während der Beschleunigungsphase ergibt die in Bild 4.26 dargestellte Antwortverteilung. Insgesamt wird die Qualität während der Beschleunigungsphase überwiegend als hoch bewertet. Bemerkenswert ist die bessere Bewertung der beiden stärkeren Manöver, trotz größerer Neigungswinkel, gegenüber dem Manöver mit der geringsten Beschleunigungen. Dieser abschließende Gesamteindruck der Probanden untermauert, dass die Wiedergabe einer Beschleunigung mit sehr hoher Übereinstimmung zu realen Fahrt möglich ist.

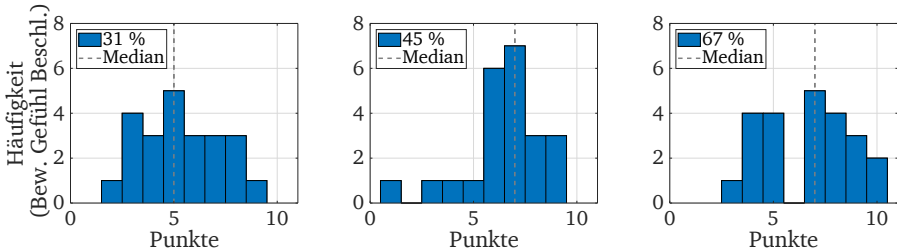


Bild 4.26: Häufigkeitsverteilung der Angaben zur Qualität des Beschleunigungsgefühls während der Beschleunigungsphase von 1 (sehr gering) bis 10 (sehr hoch)

4.3.4 Fazit

Die vorgestellte Studie diente der Überprüfung, ob die im Simulator erhaltenen Beurteilungsergebnisse valide, d. h. auf eine reale Fahrsituation übertragbar sind. Im Folgenden soll kurz zusammengefasst werden, mit welchen Stärken und

Schwächen das Erleben und Beurteilen der Längsdynamik im Simulator verbunden ist.

Mit dem vorausschauenden MCA wurden drei Anfahrmanöver simuliert, von denen das sportlichste ein Beschleunigungsniveau von $3,89 \frac{m}{s^2}$ erreicht. Dieser Wert ist verglichen mit den üblicherweise in Simulatoren dargestellten Beschleunigungen als hoch anzusehen und verdeutlicht das Potential des Simulators und der vorausschauenden, optimierungsbasierten MCA. Positiv hervorzuheben ist zudem die annähernd übereinstimmende Einschätzung der Beschleunigungsstärken aller drei Manöver zwischen den Testumgebungen.

Anhand der Bewertungen des Rucks und des Ruckelns kann kein klares Fazit gezogen werden. Die Bewertung beider Phänomene erfolgt im Simulator mit teilweise signifikanten Unterschieden zum Fahrzeug. Der Vergleich zwischen den Testumgebungen zeigt weiterhin, dass die Beurteilbarkeit der Beschleunigungsphase im Simulator durch die vor- und nachgelagerten Manöverphasen nur geringfügig beeinträchtigt wird. Die geringe Beeinträchtigung ist einem Nachteil des vorausschauenden MCA geschuldet. Die hohe physikalische Validität während der Beschleunigungsphase wird auf Kosten der Vor- und nachgelagerten Manöverphasen erreicht. Darunter zu verstehen ist die erhöhte Stellaktivität des Bewegungssystem in Phasen geringer Beschleunigungen, wodurch Störreize in Form von Geräuschen und Vibrationen wahrnehmbar sind. Da diese mit dem simulierten Fahrzustand konkurrieren, kann eine unnatürliche Bewegungswahrnehmung entstehen. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Nachteil, abgesehen von der initialen Kriechphase, grundsätzlich auch mit anderen Formen der Tilt-Coordination verbunden ist.

Eine weitere Abweichung ergibt sich in der Beurteilung des Komforts. Die Fahrten im Simulator wurden unkomfortabler eingeschätzt als im Fahrzeug. Zu genauen Ursachen kann keine Aussage getroffen werden. Komfortaspekte müssen daher differenzierter abgefragt werden als in der vorliegenden Studie.

Die Validierungsstudie lässt keine abschließende verallgemeinerte Aussage über das valide Erleben und Beurteilen der Längsdynamik im Fahrsimulator zu, jedoch ist die grundsätzliche Tauglichkeit auch nicht widerlegt.



5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel betrachtet abschließend die Kernerkenntnisse der Arbeit und diskutiert Ansätze für weitere Forschungsarbeiten.

5.1 Zusammenfassung

Das Hauptanliegen dieser Arbeit liegt darin, einen Beitrag zur verbesserten Darstellung der Längsdynamik in einem dynamischen Fahr Simulator zu leisten und damit die Einsetzbarkeit dynamischer Simulatoren in der Antriebsstrangentwicklung zu steigern. Vor diesem Hintergrund wurden in einem neuartigen Fahr Simulator ein optimierungsbasierter, prädiktiver MCA untersucht, um die Fragestellung zu klären, ob eine Beurteilung der simulierten Längsdynamik valide, d. h. auf eine reale Fahrt übertragbar, ist. Diese eröffnet die Möglichkeit kostenintensive Fahrerproben mit dynamischen Fahr Simulationen zu substituieren und den automobilen Entwicklungsprozess effizienter zu gestalten.

Die zentralen Schritte der Dissertation sind die Entwicklung des Bewegungssystems, die Umsetzung des MCA und die Durchführung von Probandenstudien. Eine umfassende Literaturrecherche zur Bewegungswahrnehmung und zu den bisherigen Erkenntnissen im Bereich prädiktiver MCA bilden zu diesem Zweck das theoretische Fundament. Im Bezug auf die multisensorischen Verarbeitung von Bewegungseindrücken in Simulatoren zeigte die Recherche die tragende Rolle vestibulärer (sowie der daran gekoppelten somatosensorischen) und optischer Reize. Zudem wurde der Einfluss des Tilt-Coordination-Drehzentrums herausgestellt und diskutiert. Aus theoretischen Gesichtspunkten sollte das Drehzentrum auf Kopfhöhe liegen, woraus sich eine wesentliche Anforderungen an das Bewegungssystem ergab. Bisherige Studien zu vorausschauenden MCA verdeutlichen die Überlegenheit vorausschauender gegenüber klassischen Ansätzen hinsichtlich der Nachbildung vestibulärer Reize. Während die recherchierten Untersuchungen sich auf den Vergleich der beiden Ansätze beschränkt, wurde in dieser Arbeit ein Vergleich mit Versuchsfahrten im kontrollierten Feld angestrebt. Die Untersuchungen beschränken sich dabei auf vordefinierte, rein längsdynamische Fahr Szenari-

en, die eine höchstmögliche Potentialausschöpfung der vorausschauenden MCA und des Bewegungssystems gewährleisten.

Der entwickelte längsdynamische Fahr Simulator Driveception zeichnet sich durch eine geringe, bewegte Masse und eine Verstellbarkeit des Drehzentrums aus, ohne zeitgleich eine starke Reduktion des Arbeitsraums hinnehmen zu müssen. Zur Darstellung von Beschleunigungen stehen dem System ein horizontaler Arbeitsraum von 10 m und ein Neigungswinkel von bis zu $\pm 25^\circ$ zur Verfügung. Eine abschließende Analyse, bei der das Übertragungsverhalten des horizontalen Freiheitsgrads den Schwerpunkt bildet, veranschaulicht die Leistungsfähigkeit des Systems.

Die erste Studie untersucht den Einfluss der Drehpunktlage auf die Simulationsgüte. Anhand der Antworten der Probanden zeigt sich eine geringe Differenzierbarkeit zwischen den Drehzentrumslagen, weshalb von einem geringen Einfluss auf die wahrgenommene Beschleunigung ausgegangen wird. Dennoch sollte in der dynamischen Fahrsimulation ein Drehzentrum auf Höhe des Fahrer Kopfes oder darüber genutzt werden, da zumindest die Tendenz zu erkennen ist, dass sich diese positiv auf die Simulationsgüte auswirkt. Dies gilt auch, wenn das Drehzentrum über dem Kopf liegt. Für die weiteren Studien dieser Arbeit wurde daher ein Drehzentrum 1 m oberhalb der neigbaren Plattform gewählt.

In einer weiteren Studie konnte nachgewiesen werden, dass sich die Differenzierbarkeit der Beschleunigungsstärke durch Verwendung des vorausschauende MCA gegenüber einer horizontalen Beschleunigungsdarstellung nicht ändert. Infolge dieses Ergebnisses ist davon auszugehen, dass ein vorausschauender MCA grundsätzlich für die Beurteilung der Fahrbarkeit tauglich ist.

Die abschließende Validierungsstudie lässt keine verallgemeinerten Aussagen über die Verwendung des vorausschauenden MCA für das Erleben und Beurteilen des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens zu. Anhand von verschiedenen Kriterien sollten Probanden als Beifahrer Anfahrmanöver unterschiedlicher Beschleunigungsstärken unmittelbar hintereinander im Fahrzeug und im Simulator bewerten. Wichtige Merkmale, die das Erlebte zum Ausdruck bringen, wurden in beiden Testumgebungen lediglich teilweise ähnlich bewertet. Überwiegend nicht übereinstimmend wurden der Komfort und das NVH-Verhaltens in der Simulation bewertet, was zum einen der Kompaktheit des Simulators geschuldet ist und zum anderen der hohen Stellaktivität des vorausschauenden MCA während der Manöverphasen geringer Beschleunigung. Die Tauglichkeit der vorausschauenden MCA

für das Erleben und Beurteilen der Längsdynamik wird mit dieser Arbeit jedoch auch nicht widerlegt und sollte durch weitere Forschungen untersucht werden.

5.2 Ausblick

Der neu entwickelte Simulator biete Ansatzpunkte, die zu einer weiteren Steigerung der Simulationsgüte führen. Der darstellbare Frequenzbereich der Horizontalachse ist limitiert. Eine Erweiterung der Bandbreite kann durch konstruktive Änderungen oder eine Filterung erzielt werden. Wie sich auch herausstellte, werden die stärksten Abweichungen vom idealen Übertragungsverhalten durch die Anbringung des verstellbaren Cockpits und der vorderen Aktoren verursacht, welche dementsprechend Ansatzpunkte darstellen, um Änderungen vorzunehmen.

Ein störender Faktor sind die vom Bewegungssystem erzeugten Geräusche und Vibrationen. Zum einen kann Abhilfe geschaffen werden durch eine verbesserte Isolation des Probanden. Eine deutlich aufwendigere Lösung wäre eine Überarbeitung der Führung der Linearachse. Mit einer Führung mittels Rollen oder eines Luftkissens werden deutlich geringere Emissionen erwartet. Die Umsetzung als Gleitführung würde ebenfalls den gewünschten Effekt erzielen, jedoch müsste diese mindestens für Geschwindigkeiten über $3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ geeignet sein, da diese im bisherigen Betrieb bereits erreicht wurden. Zu beachten ist zudem, dass eine alternative Lösung eine ausreichend hohe Steifigkeit besitzt, um den Luftspalt von 0,5 mm zwischen den Permanentmagneten und dem Primärteil des Linearaktors bei dynamischen Manövern zu gewährleisten.

Ein weiterer störender Faktor, der von den Probanden genannt wird, ist das Sichtsystem. Das HMD stellt in Kombination mit hohen Beschleunigungen des Sichtsystem häufiger Sprünge in der VR dar. Zudem ist es wünschenswert, eine höhere Auflösung zu erreichen. Die Verwendung eines alternativen HMD oder die Verwendung eines hinter dem Lenkrad angebrachten Displays kann die durch das Sichtsystem bestehenden Störfaktoren beseitigen. Die Verwendung des Displays hätte den Vorteil, dass Fahrer ihren eigenen Körper sehen, gleichzeitig jedoch auch den künstlichen Innenraum der Fahrgastzelle.

Eine Erweiterung, die vorgenommen werden sollte, um die Reizdarstellung des Simulators zu vervollständigen, ist die Entwicklung einer Datenbasis für Geräusche und Vibrationen. Auch wenn die entsprechenden Darstellungskanäle bereits existieren, fehlt zum aktuellen Zeitpunkt die Datengrundlage, um aus

einem Fahr- und Fahrzeugzustand heraus die Frequenzen und Amplituden zur NVH-Nachbildung zu berechnen.

Die Diskussion der Studienergebnisse ergaben Fragestellungen, die in weiteren experimentellen Evaluationen beleuchtet werden sollten. Mit der zuvor genannten NVH-Datenbasis bestünde die Möglichkeit, deren Einfluss auf die Beschleunigungswahrnehmung zu analysieren. Es stellt sich hierbei zudem die Frage, in wie weit sich mit der Nachbildung der realen NVH-Phänomene eine Maskierung der durch das Bewegungssystem emittierten Reize erzielen lässt und wie sich dies auf den Komfort auswirkt.

Da ein Simulator mit einem vorausschauenden MCA eine deutlich höhere Fahrdynamik als bisher üblich erreicht, rückt das von Stratulat erforschte Wahrnehmungsphänomen in den Fokus, das starke, durch Tilt Coordination dargestellte Verzögerungen zu intensiv wahrgenommen werden. Die Erforschung dieses Zusammenhangs wird daher als erforderlich erachtet und könnte in der Kostenfunktion des optimierungsbasierten, vorausschauenden MCA Berücksichtigung finden.

A Herleitung der Dynamik

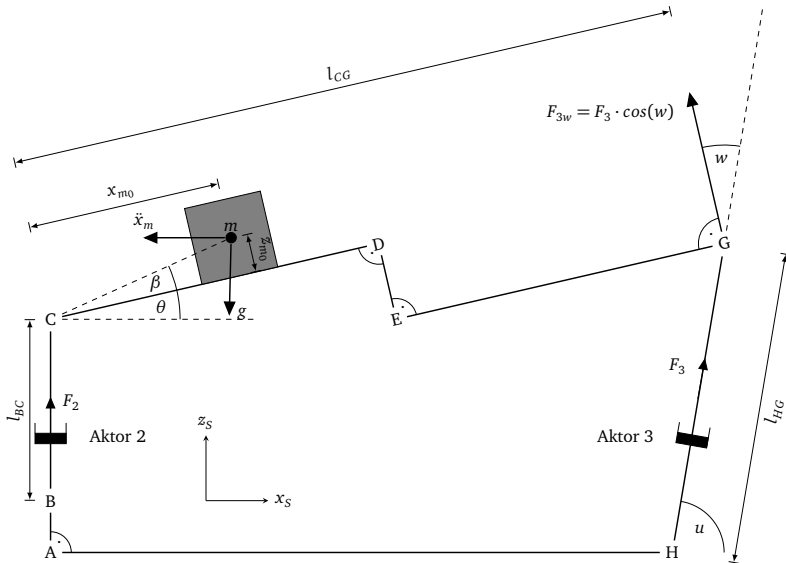


Bild A.1: Skizze des Bewegungssystems mit Punktmasse zur Herleitung der Dynamik

Dieses Kapitel beinhaltet die Herleitung der Dynamik zur Berechnung der Aktorkräfte F_2 und F_3 . Da die Kräfte in horizontaler Richtung von einer Führung abgestützt werden, welche am Punkt C angreift, erfolgt eine Zerlegung der an dieser Stelle wirkenden Kräfte in $F_{2,z}$ und $F_{2,x}$. In die Berechnung gehen lediglich die maßgeblich zur Dynamik beitragenden Kräfte ein. Dazu zählen die Anteile aufgrund von Gravitation, einer translatorischen Beschleunigung des Schlittens und einer Hubbewegung der oberen Plattform. Da die Plattform langsame Drehbewegungen durchführt, wird auf eine Kräfteberechnung zur Abstützung von Drehträgheiten verzichtet.

Ausgangspunkt für die vorliegende Herleitung ist das in Bild A.1 dargestellte dynamische System mit der im Punkt m konzentrierten Plattform- und Probandenmasse.

A.1 Abstand des Schwerpunktes zum Punkt C

$$l_m = \sqrt{x_m^2 + z_m^2} \quad (\text{A.1})$$

A.2 Kräfte aufgrund der Gravitation

$\sum F_z$:

$$F_{2,x} + F_3 \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) - mg = 0 \quad (\text{A.2})$$

$\sum F_x$:

$$F_{2,x} + F_3 \sin\left(\frac{\pi}{2} - u\right) = 0 \quad (\text{A.3})$$

$\sum M_C$:

$$F_3 l_{CG} \cos w - mg x_m \cos \theta = 0 \quad (\text{A.4})$$

Daraus ergeben sich für die Kräfte:

$$F_3 = \frac{mg x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \quad (\text{A.5})$$

$$F_{2,z} = mg - \frac{mg x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \quad (\text{A.6})$$

$$F_{2,x} = -\frac{mg x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \quad (\text{A.7})$$

A.3 Anteil durch Translation der Plattform

$$\sum F_x:$$

$$F_{2,x} + F_3 \sin\left(\frac{\pi}{2} - u\right) = m\ddot{x}_m \quad (\text{A.8})$$

$$\sum F_z:$$

$$F_{2,z} + F_3 \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\sum M_C:$$

$$F_3 l_{CG} \cos w + m\ddot{x}_m l_m \sin(\beta + \theta) = 0 \quad (\text{A.10})$$

Daraus ergeben sich für die Kräfte:

$$F_3 = -\frac{m\ddot{x}_m l_m \sin(\beta + \theta)}{l_{CG} \cos w} \quad (\text{A.11})$$

$$F_{2,z} = \frac{m\ddot{x}_m l_m \sin(\beta + \theta) \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right)}{l_{CG} \cos w} \quad (\text{A.12})$$

$$F_{2,x} = m\ddot{x}_m \left(1 + \frac{l_m \sin(\beta + \theta) \sin\left(\frac{\pi}{2} - u\right)}{l_{CG} \cos w}\right) \quad (\text{A.13})$$

A.4 Kräfte aufgrund von Hubbewegungen der Plattform

$$\sum F_z:$$

$$F_2 + F_3 \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) - m\ddot{z}_m = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$\sum M_C:$$

$$F_3 l_{CG} \cos w - m\ddot{z}_m x_m \cos \theta = 0 \quad (\text{A.15})$$

Daraus ergeben sich für die Kräfte:

$$F_3 = \frac{m\ddot{z}_m x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \quad (\text{A.16})$$

$$F_2 = m\ddot{z}_m - \frac{m\ddot{z}_m x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \quad (\text{A.17})$$

$$F_{2,x} = -F_3 \sin\left(\frac{\pi}{2} - u\right) = -\frac{m\ddot{z}_m x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \quad (\text{A.18})$$

A.5 Summation der Kraftanteile

$$\begin{aligned} F_3 &= mg \cdot \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \\ &\quad - m\ddot{x}_m \cdot \frac{l_m \sin(\beta + \theta)}{l_{CG} \cos w} \\ &\quad + m\ddot{z}_m \cdot \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

$$\begin{aligned} F_{2,z} &= mg \cdot \left(1 - \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \\ &\quad + m\ddot{x}_m \cdot \frac{l_m \sin(\beta + \theta)}{l_{CG} \cos w} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \\ &\quad + m\ddot{z}_m \cdot \left(1 - \frac{x_m \cos \theta}{l_{CG} \cos w}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - u\right) \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

B Fragebögen

Kreuzen Sie an, wie sehr die folgenden Symptome auf Ihren momentanen Zustand zutreffen.				
	gar nicht	etwas	mittel	stark
Allgemeines Unwohlsein	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ermüdung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kopfschmerzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
angestrenzte Augen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schwierigkeiten, scharf zu sehen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
erhöhter Speichelfluss	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schwitzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Übelkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konzentrationsschwierigkeiten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kopfdruck	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
verschwommenes Sicht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schwindel (Augen offen)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schwindel (Augen zu)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gleichgewichtsstörung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Magen macht sich bemerkbar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aufstoßen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bild B.1: Simulator Sickness Questionnaire

Bewertung Anfahrmanöver, Auto, APP31

Bitte geben Sie eine Bewertung für die vier Beschleunigungsmanöver ab. Die ersten fünf Fragen beziehen sich lediglich auf die Beschleunigungsphase.

Wie stark empfanden Sie die Beschleunigung?

sehr schwach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	sehr stark
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Wie komfortabel empfanden Sie die Beschleunigung?

Nicht komfortabel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	sehr komfortabel
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Wie ruckartig empfanden Sie den Aufbau der Beschleunigung (erster Beschleunigungsschub)?

Nicht ruckartig	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	sehr ruckartig
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Wie stark empfanden Sie das längsdynamische Ruckeln während der Beschleunigung?

sehr schwach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	sehr stark
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Wie stark haben die Kriech-/Brems-/Stillstandsphase Ihre Bewertung der Beschleunigungsphase beeinflusst?

sehr schwach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	sehr stark
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Die folgenden Fragen beziehen sich auf das gesamte Manöver.

Wie laut wurden Geräusche neben dem Rauschen wahrgenommen?

sehr schwach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sehr stark
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

In welchen Phasen haben Sie Geräusche am stärksten wahrgenommen? Bewerten Sie die Phasen mit 1 (am schwächsten) bis 4 (am stärksten).

Kriechphase	
Beschleunigungsphase	
Abbremsphase	
Stillstandsphase	

Wie stark wurden Vibrationen wahrgenommen?

sehr schwach	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sehr stark
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

In welchen Phasen haben Sie Vibrationen am stärksten wahrgenommen? Bewerten Sie die Phasen mit 1 (am schwächsten) bis 4 (am stärksten).

Kriechphase	
Beschleunigungsphase	
Abbremsphase	
Stillstandsphase	

Bild B.2: Fragebogen zur Bewertung des Anfahrmanövers im Fahrzeug und im Simulator

C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Promotion wurden Abschluss- und Projektarbeiten betreut. Dabei entstanden folgenden Ausarbeitungen.

Masterarbeiten

Möller, T. „Entwicklung und Untersuchung eines aktiven Bremspedals für einen dynamischen Fahrzeugsimulator“. Master Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2018.

Ronellenfisch, A. „Entwicklung von Methoden zur Ansteuerung eines längsdynamischen Fahrzeugsimulators“. Master Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2016.

Thein, S. „Entwicklung eines modellprädiktiven Motion-Cueing-Algorithmus für einen längsdynamischen Fahrzeugsimulator“. Master Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2017.

Bachelorarbeiten

Behnke, O. „Vorbereitung und Umsetzung von Probandentests an einem längsdynamischen Fahrzeugsimulator“. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2017.

Bender, L. J. „Überarbeitung und Erweiterung eines Fahrdynamikmodells für einen längsdynamischen Fahrzeugsimulator“. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2017.

Betancourt Bautista, M. A. „Untersuchung von Motion-Cueing-Algorithmen für einen längsdynamischen Fahrzeugsimulator“. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2015.

Bok, D. „Entwicklung eines linearen Bewegungssystems mit Sicherheitsmechanismus für einen Fahrzeugsimulator“. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2015.

Walasek, M. „Analyse und Aufbereitung von NVH- und CAN-Signalen für die Einbindung in einen Fahrzeugsimulator“. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt, 2015.

Advanced Design Projects/Advanced Research Projects

Bagirov, K., Ballenberger, T., Gleibs, T., Huch, S., Mudhafar, S. H., u. Raab, C. „Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur NVH-Isolation von Probanden in einem Fahrzeugsimulator“. Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, 2017.

Bauer, S., Eberhard, E., Euteneuer, R., Kegenhof, T., u. Sauer, F. „Entwicklung eines Fahrzeugsimulator-Bewegungssystems“. Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, 2014.

Böhmert, N., Gahunia, A., Popp, C., u. Post, F. „Untersuchungen zum Einfluss der Drehpunktlage auf die Güte einer dynamischen Fahrsimulation und von Möglichkeiten zum aktiven Fahren mit offline optimierten Trajektorien“. Advanced Research Project. Technische Universität Darmstadt, 2018.

Jakob, M., Lachnit, J., Pfeiffer, S., Liebe, A., u. Trappen, T. „Entwicklung eines Fahrzeugsimulator-Cockpits“. Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, 2015.

Keune, A., Tannich, M., Krautkrämer, L., Doll, P., u. Lutz, J. „Integration eines Fahrdynamik- und NVH-Modells in die Ansteuerung eines dynamischen Fahrzeugsimulators“. Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, 2016.

Martin, E., Jiao, H., Li, L., Wang, S., Stepper, M., u. Huang, F. „Entwicklung eines Fahrzeugsimulator- Bewegungssystems mit einstellbarer Drehpunktlage des rotierenden Subsystems“. Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, 2014.

Ryma, Y., Weidenfeller, C., Merkel, N. L., u. Luft, A. „Entwicklung eines Fahrzeugsimulator-Bewegungssystems mit online veränderlicher Drehpunktlage des rotie-

renden Subsystems“. Advanced Design Project. Technische Universität Darmstadt, 2014.

Forschungsseminare

Framing, C.-E. „Untersuchung von Motion Cueing Algorithmen und Regelungskonzepten für Fahrsimulatoren“. Forschungsseminar. Technische Universität Darmstadt, 2014.

Holder, M. „Noise, Vibration and Harshness im Fahrzeug und der Einfluss auf den Fahrkomfort“. Forschungsseminar. Technische Universität Darmstadt, 2014.

Istoc, S. B. „Validierung von dynamischen Fahrsimulatoren“. Forschungsseminar. Technische Universität Darmstadt, 2014.



Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur der Arbeit	5
2.1	Schema zur Sinnesphysiologie	8
2.2	Schema der Bogengangsorgane und der Maculaorgane	11
2.3	Nachbildung der im Fahrzeug erlebten spezifischen Kraft	23
2.4	Tilt-Coordination mit Fliehbeschleunigung und transl. Beschl.	24
2.5	Einordnung des MCA	26
2.6	Struktur des Classical-Washout-Algorithmus	28
2.7	Veranschaulichung der modellprädiktiven Regelung	31
2.8	Schwingungs- und Akustikphänomene beim Lastwechsel	36
2.9	Serie von Lastwechselmanövern	37
2.10	Verschiedene dynamische Simulatoren	40
3.1	V-Modell nach [145]	44
3.2	Grundkonzept des dynamischen Simulators	49
3.3	Skizze des Bewegungssystems mit Punktmasse	51
3.4	Längsdynamischer Fahr Simulator Driveception im geneigten Zustand	55
3.5	Aus A-Klasse entnommene Komponenten.	57
3.6	Bremspedalmodul und Fahrpedal	59
3.7	Interaktion zwischen RT-PC, VR-PC, Schaltschrank und Simulator	62
3.8	Modifizierung des Lastwechselprofils	67
3.9	MCA Optimierungsergebnis	73
3.10	Algorithmus zur Trajektoriengenerierung	75
3.11	Neigungswinkel-Drehzentrum-Kombinationen	77
3.12	Signale der Latenzmessung	80
3.13	Sollbeschleunigung zur Schätzung des Übertragungsverhaltens	82
3.14	Vergleich der Übertragungsverhalten und Kohärenzen, 1	85
3.15	Vergleich der Übertragungsverhalten und Kohärenzen, 2	86
3.16	Vergleich der Übertragungsverhalten und Kohärenzen, 3	87

4.1	Trajektorie zur Untersuchung Einfluss Drehpunktlage	91
4.2	Ergebnisse des Versuchs zum Einfluss der Drehpunktlage	95
4.3	Trajektorie Lastwechsel rein horizontal	98
4.4	Trajektorie Lastwechsel vorausschauender MCA	98
4.5	Versuchsfahrzeug und Fahrpedalblockierung	104
4.6	Variation der Fahrpedalstellung und resultierenden Beschleunigungen	104
4.7	Beschleunigungsmanövers mit 31 % Fahrpedalstellung	106
4.8	Beschleunigungsmanövers mit 45 % Fahrpedalstellung	107
4.9	Beschleunigungsmanövers mit 67 % Fahrpedalstellung	107
4.10	Drehknopf und Skala	110
4.11	Fragebogen Inkongruenzen und Qualität Beschleunigungsgefühl	111
4.12	Versuchsablauf der Validierungsstudie	113
4.13	Mittelung Versuchsfahrten und Vergleich Simulator 31%	115
4.14	Mittelung Versuchsfahrten und Vergleich Simulator 45%	115
4.15	Mittelung Versuchsfahrten und Vergleich Simulator 67%	116
4.16	Korrelation max. Beschl. und Beschleunigungstärke	118
4.17	Korrelation max. Beschl. und Komfort	119
4.18	Korrelation max. Beschl. und Ruck	120
4.19	Korrelation max. Beschl. und Ruckeln	121
4.20	Korrelation max. Beschl. und Beeinflussung	122
4.21	Korrelation max. Beschl. und Geräusche	123
4.22	Korrelation max. Beschl. und Vibrationen	124
4.23	Bewertungspunkte Einschätzung Geräuschpegelverhältnisse	125
4.24	Bewertungspunkte Einschätzung Vibrationsstärkeverhältnisse	125
4.25	Resultate Ursachen für Inkongruenzen	127
4.26	Resultat Qualität des Beschleunigungsgefühl	128
A.1	Skizze des Bewegungssystems mit Punktmasse	135
B.1	Simulator Sickness Questionnaire	139
B.2	Exemplarischer Bogen zur Bewertung des Anfahrmanövers	140

Tabellenverzeichnis

2.1	Wahrnehmungsschwellen	20
2.2	Darstellungsgrenzen der vorgestellten Simulatoren	42
3.1	Anforderungen	47
3.2	Zielkonflikte der Bewegungssystemauslegung	53
3.3	Gewählte Parameter der inversen Kinematik	54
3.4	Resultate der Dynamiksimulation	54
3.5	Aktorspezifikationen	56
3.6	Spezifikationen der Oculus Rift [148]	60
3.7	Modifikationen am 3D-Fahrzeugmodell	60
3.8	Ergebnisse der Parameterschätzung	78
3.9	Darstellungsgrenzen des Bewegungssystems	78
3.10	Ergebnisse der Latenzmessungen	81
3.11	Versuchsvariationen zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens	82
4.1	Beschränkungen für die Berechnung der Trajektorien	91
4.2	UV der Untersuchung des Einflusses der Drehzentrumslage	92
4.3	Hypothesen zum Einfluss der Drehzentrumslage	92
4.4	Beschränkungen für die Berechnung der Trajektorien	97
4.5	UV der Untersuchung zum Einfluss der Tilt-Coordination	99
4.6	Hypothesen der Wahrnehmungsschwellenuntersuchung	100
4.7	Mittelwert und Standardabweichung U_θ und U_x	102
4.8	Beschränkungen für die Berechnung der Trajektorien	106
4.9	UV der Validierungsstudie	108
4.10	Hypothesen der Validierung des Fahrsimulators	112
4.11	Ergebnisse des Wilcoxon-Signifikanztests	117



Literatur

- [1] C. Ahlström, A. Bolling, G. Sörensen, O. Eriksson und A. Andersson, „Validating speed and road surface realism in VTI driving simulator III“, VTI Bericht, 2012.
- [2] H. Arioui, S. Hima, L. Nehaoua, R. J. V. Bertin und S. Espié, „From Design to Experiments of a 2-DOF Vehicle Driving Simulator“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 60, Nr. 2, S. 357–368, Feb. 2011. DOI: 10.1109/TVT.2010.2090675.
- [3] M. Barnett-Cowan und L. R. Harris, „Perceived timing of vestibular stimulation relative to touch, light and sound“, *Experimental Brain Research*, Bd. 198, Nr. 2-3, S. 221–231, Sep. 2009. DOI: 10.1007/s00221-009-1779-4.
- [4] M. Baseggio, A. Beghi, M. Bruschetta, F. Maran und D. Minen, „An MPC approach to the design of motion cueing algorithms for driving simulators“, in *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Nov. 2011, S. 692–697. DOI: 10.1109/ITSC.2011.6083053.
- [5] E. Baumgartner, A. Ronellenfitsch, H.-C. Reuss und D. Schramm, „Using a dynamic driving simulator for perception-based powertrain development“, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Okt. 2017. DOI: 10.1016/j.trf.2017.08.012.
- [6] BEC, *Bewegungssimulatoren*. Adresse: <https://www.b-e-c.de/de/simulatoren/> (besucht am 08.12.0201).
- [7] C. Becker-Carus und M. Wendt, „Wahrnehmung“, in *Allgemeine Psychologie*, 2. Aufl., Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-53006-1.
- [8] A. Beghi, M. Bruschetta und F. Maran, „A real time implementation of MPC based Motion Cueing strategy for driving simulators“, in *51st IEEE Conference on Decision and Control*, Dez. 2012. DOI: 10.1109/CDC.2012.6426119.

-
- [9] M. Behrendt, *A basic working principle of Model Predictive Control*. Adresse: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:MPC_scheme_basic.svg&oldid=143056700 (besucht am 07.01.2019).
- [10] T. Bellmann, J. Heindl, M. Hellerer, R. Kuchar, K. Sharma und G. Hirzinger, „The DLR Robot Motion Simulator Part I: Design and setup“, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, Mai 2011. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5979913.
- [11] A. J. Benson, M. B. Spencer und J. R. Stott, „Thresholds for the detection of the direction of whole-body, linear movement in the horizontal plane“, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Bd. 57, Nr. 11, S. 1088–1096, Nov. 1986.
- [12] D. R. Berger, J. Schulte-Pelkum und H. H. Bülthoff, „Simulating believable forward accelerations on a stewart motion platform“, *ACM Transactions on Applied Perception*, Bd. 7, Nr. 1, S. 1–27, Jan. 2010. DOI: 10.1145/1658349.1658354.
- [13] A. Betz, „Feasibility Analysis and Design of Wheeled Mobile Driving Simulators for Urban Traffic Simulation“, Dissertation, TU Darmstadt, 2015.
- [14] P. Biemelt, S. Henning, N. Rüdtenklau, S. Gausemeier und A. Trächtler, „A Model Predictive Motion Cueing Strategy for a 5-Degree-of-Freedom Driving Simulator with Hybrid Kinematics“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Juan-les-Pins, Frankreich, Sep. 2018.
- [15] E. Blana, „Driving Simulator Validation Studies: A Literature Review“, Working Paper 480, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1996.
- [16] J. Bortz und C. Schuster, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, 7. Aufl. Springer, 2010. DOI: 10.1007/b137571.
- [17] J. E. Bos, E. L. C. M. Berg-Kroon, M. M. J. Houben und O. X. Kuiper, „Seeing, Feeling, and Assessing Self-Motion in Real and Virtual Environments“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Juan-les-Pins, Frankreich, Sep. 2018.
- [18] H.-H. Braess und U. Seiffert, Hrsg., *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 7. Aufl. Springer Vieweg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-658-01691-3.

-
- [19] W. Brems, J. Van Doornik, E. de Vries und J. Wiedemann, „Frequency response and latency analysis of a driving simulator for chassis development and vehicle dynamics evaluation“, in *Proceedings of the Europe Driving Simulation Conference & Exhibition*, Tübingen, Sep. 2015.
- [20] L. Bringoux, V. Nougier, L. Marin, P-A. Barraud und C. Raphel, „Contribution of Somesthetic Information to the Perception of Body Orientation in the Pitch Dimension“, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, Bd. 56, Nr. 5, S. 909–923, Juli 2003. DOI: 10.1080/02724980245000016.
- [21] M. Bruschetta, F. Maran und A. Beghi, „A Nonlinear, MPC-Based Motion Cueing Algorithm for a High-Performance, Nine-DOF Dynamic Simulator Platform“, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Bd. 25, Nr. 2, März 2016. DOI: 10.1109/TCST.2016.2560120.
- [22] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen und M. Vollrath, *Automobilergonomie*, 1. Aufl. Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-8348-2297-0.
- [23] T. Butz, *Fourier transformation for pedestrians*, 2. Aufl. Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-16985-9.
- [24] E. F. Camacho und C. Bordons, *Model predictive control*. Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-0-85729-398-5.
- [25] T. Chapron und J.-P. Colinot, „The new psa peugeot-citroen advanced driving simulator overall design and motion cue algorithm“, in *Proceedings of Driving Simulation Conference*, Iowa City, Iowa, Sep. 2007.
- [26] Clarksynthesis, *TST-429-Brochure*. Adresse: <http://clarksynthesis.com/wp/wp-content/uploads/2011/06/TST-429-Brochure.pdf> (besucht am 10.01.2019).
- [27] D. Cleij, J. Venrooij, P. Pretto, M. Katliar, H. Bülthoff, D. Steffen, F. Hoffmeyer und H.-P. Schöner, „Comparison between filter- and optimization-based motion cueing algorithms for driving simulation“, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Mai 2017. DOI: 10.1016/j.trf.2017.04.005.
- [28] F. Colombet, Z. Fang und A. Kemeny, „Tilt thresholds for acceleration rendering in driving simulation“, *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Nov. 2016. DOI: 10.1177/0037549716675955.

-
- [29] F. Colombet, D. Paillot, F. Mérienne und A. Kemeny, „Impact of geometric field of view on speed perception“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2010.
- [30] B. J. Correia Grácio, J. E. Bos, M. M. van Paassen und M. Mulder, „Perceptual scaling of visual and inertial cues: Effects of field of view, image size, depth cues, and degree of freedom“, *Experimental Brain Research*, Bd. 232, Nr. 2, S. 637–646, Feb. 2014. DOI: 10.1007/s00221-013-3772-1.
- [31] B. J. Correia Grácio, „The effects of specific force on self-motion perception in a simulation environment“, Dissertation, TU Delft, 2013.
- [32] M. Dagdelen, G. Reymond, A. KEMENY, M. Bordier und N. Maïzi, „MPC based Motion Cueing Algorithm: Development and Application to the ULTIMATE Driving Simulator“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2004.
- [33] R. Dittmar und B.-M. Pfeiffer, *Modellbasierte prädiktive Regelung: Eine Einführung für Ingenieure*, 1. Aufl. Oldenbourg, 2004. DOI: 10.1524/9783486594911.
- [34] R. Dobbeck, „Darstellung von Beschleunigungen in Fahr simulatoren bis in den Grenzbereich“, Dissertation, Technische Universität Berlin, 1974.
- [35] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm und B. Jung, *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*, 1. Aufl. Springer Vieweg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-28903-3.
- [36] F. M. Drop, M. Olivari, M. Katliar und H. H. Bülthoff, „Model Predictive Motion Cueing: Online Prediction and Washout Tuning“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Juan-les-Pins, Frankreich, Sep. 2018.
- [37] F. Ellensohn, J. Venrooij, M. Schwienbacher und D. Rixen, „Experimental evaluation of an optimization-based motion cueing algorithm“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Juan-les-Pins, Frankreich, Sep. 2018.

-
- [38] P Erler, A. Menig, F. Uphaus, C. A. M. Makosi, S. Rinderknecht und J. Vogt, „Investigating the perception of powertrain shuffle with a longitudinal dynamic driving simulator“, in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2018, S. 1427–1431. DOI: 10.1109/AIM.2018.8452255.
- [39] P Erler und S. Rinderknecht, „A newly developed 3 DOF driving simulator for longitudinal dynamics perception investigation“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Stuttgart, Sep. 2017.
- [40] P Erler, S. Thein und S. Rinderknecht, „The Influence of the Center of Rotation on the Simulation Quality using an Offline Optimization-Based Motion Cueing Algorithm“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Juan-les-Pins, Frankreich, Sep. 2018.
- [41] M. O. Ernst und H. H. Bülthoff, „Merging the senses into a robust percept“, *Trends in Cognitive Sciences*, Bd. 8, Nr. 4, S. 162–169, Apr. 2004. DOI: 10.1016/j.tics.2004.02.002.
- [42] M. O. Ernst und H. H. Bülthoff, „Multisensorische Wahrnehmung des Menschen“, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen, Jahresbericht, 2005.
- [43] EtherCAT, *EtherCAT Technology Group - EtherCAT*. Adresse: <https://www.ethercat.org/de/technology.html#1.7> (besucht am 09. 01. 2015).
- [44] Z. Fang, F. Colombet, J. Collinet und A. Kemeny, „Roll Tilt Thresholds for 8 Dof Driving Simulators“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2014.
- [45] Z. Fang, G. Reymond und A. Kemeny, „Performance identification and compensation of simulator motion cueing delays“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2010.
- [46] M. Fischer, „The new time-variant motion cueing algorithm for the DLR dynamic driving simulator“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Tübingen, Sep. 2008.
- [47] M. Fischer, „Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation“, Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2009.

-
- [48] M. Fischer, T. Lorenz, S. Wildfeuer und K. Oeltze, „The impact of different motion cueing aspects concerning the perceived and subjectively rated motion feedback during longitudinal and lateral vehicle control tasks“, in *Proceedings of Driving Simulator Conference Asia-Pacific*, Seoul, South Korea, Sep. 2008.
- [49] M. Fischer, A. Richter, J. Schindler, J. Plättner, G. Temme, J. Kelsch, D. Assmann und F. Köster, „Modular and Scalable Driving Simulator Hardware and Software for the Development of Future Driver Assistance and Automation Systems“, in *Proceedings of Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2014.
- [50] FKFS, *Der Stuttgarter Fahrsimulator*. Adresse: http://www.fkfs.de/uploads/media/PM_2012_05_Flyer_Stuttgarter_Fahrsimulator.pdf (besucht am 24.01.2018).
- [51] G. Fleury, „Experimentelle Untersuchung der dynamischen Masse einer sitzenden Versuchsperson bei Schwingungen in der X-Richtung zur Bildung eines Modells“, VDI-Berichte 1821, 2004.
- [52] C. E. García, D. M. Prett und M. Morari, „Model predictive control: Theory and practice - A survey“, *Automatica*, Bd. 25, Nr. 3, S. 335–348, Mai 1989. doi: 10.1016/0005-1098(89)90002-2.
- [53] K. Genuit, Hrsg., *Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*, 1. Aufl. Springer, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-01415-4.
- [54] E. B. Goldstein, *Wahrnehmungspsychologie*, 2. Aufl., M. Ritter, Hrsg. Spektrum, 2002.
- [55] E. B. Goldstein, *Wahrnehmungspsychologie*, 9. Aufl., K. Gegenfurtner, Hrsg. Springer-Verlag, 2015.
- [56] E. L. Groen und W. Bles, „How to use body tilt for the simulation of linear self motion“, *Journal of Vestibular Research*, Bd. 14, Nr. 5, S. 375–385, Jan. 2004.
- [57] J. Gruening, J. Bernard, C. Clover und K. Hoffmann, „Driving Simulation“, *SAE Technical Paper 980223*, Feb. 1998. doi: doi.org/10.4271/980223.

-
- [58] A. J. Gundry, „Thresholds of perception for periodic linear motion“, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Bd. 49, S. 679–686, Mai 1978.
- [59] A. Hagerodt, „Automatisierte Optimierung des Schaltkomforts von Automatikgetrieben“, Dissertation, Technisch Universität Braunschweig, 2003.
- [60] H. Hajek, „Längsdynamik und Antriebsakustik von elektrifizierten Straßenfahrzeugen – Beschreibung und Gestaltung des emotionalen Erlebens“, Dissertation, Technischen Universität München, 2017.
- [61] B. v. Hebenstreit, *Grundzüge einer Verkehrspsychologie*, 1. Aufl. Springer-Verlag, 1961.
- [62] H. Heerspink, W. Berkouwer, O. Stroosma, R. van Paassen, M. Mulder und B. Mulder, „Evaluation of Vestibular Thresholds for Motion Detection in the SIMONA Research Simulator“, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2005. DOI: 10.2514/6.2005-6502.
- [63] A. M. Heinecke, *Mensch-Computer-Interaktion: Basiswissen für Entwickler und Gestalter*, 2. Aufl. Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-13507-1.
- [64] B. Heißing und M. Ersoy, Hrsg., *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahr-dynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*, 2. Aufl. Springer Vieweg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-658-01992-1.
- [65] R. Held, H. W. Leibowitz und H. L. Teubner, Hrsg., *Perception*. Springer-Verlag, 1978.
- [66] M. S. Horswill und A. M. Plooy, „Auditory Feedback Influences Perceived Driving Speeds“, *Perception*, Bd. 37, Nr. 7, S. 1037–1043, Juli 2008. DOI: 10.1068/p5736.
- [67] A. Hülsmann, „Methodenentwicklung zur virtuellen Auslegung von Lastwechselphänomenen in Pkw“, Dissertation, Technische Universität München, München, 2007.
- [68] D. S. Hurwitz, M. A. Knodler und D. M. Dulaski, „Speed Perception Fidelity in a Driving Simulator Environment“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Orlando, Florida, Nov. 2005.
- [69] IEC, „DIN EN 61508-1: Functional safety of electrical/electronic/ programmable electronic safety-related systems“, IEC Bericht, 2005.

-
- [70] R. Isermann, *Mechatronische Systeme: Grundlagen*, 2. Aufl. Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-32512-3.
- [71] R. Isermann und M. Münchhof, *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*, 1. Aufl. Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-3-540-78879-9.
- [72] A. H. J. Jamson, „Driving Simulator Validity : Issues of Field of View and Resolution“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2000.
- [73] A. H. J. Jamson, „Image characteristics and their effect on driving simulator validity“, in *Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, Iowa City, Iowa, Aug. 2001.
- [74] A. H. J. Jamson, „Motion Cueing in Driving Simulators for Research Applications“, Dissertation, University of Leeds, 2010.
- [75] C. Kaernbach, „Simple adaptive testing with the weighted up-down method“, *Perception & Psychophysics*, Bd. 49, Nr. 3, S. 227–229, Mai 1991. DOI: 10.3758/BF03214307.
- [76] A. Kemeny, „Simulation and Perception“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 1999.
- [77] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum und M. G. Lilienthal, „Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 3, Nr. 3, S. 203–220, Juli 1993. DOI: doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.
- [78] T. A. Kern, Hrsg., *Engineering Haptic Devices: A Beginner’s Guide for Engineers*, 1. Aufl. Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-88248-0.
- [79] F. A. A. Kingdom und N. Prins, *Psychophysics: A Practical Introduction*, 1. Aufl. Elsevier, 2016. DOI: doi.org/10.1016/C2012-0-01278-1.
- [80] H. Kingma, „Thresholds for perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of the otolith function“, *BMC Ear, Nose and Throat Disorders*, Bd. 5, Nr. 1, Juni 2005. DOI: 10.1186/1472-6815-5-5.
- [81] M. Kleer, O. Hermanns, K. Dreßler und S. Müller, „Driving simulations for commercial vehicles-A technical overview of a robot based approach“, in *Proceedings of Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2012.

-
- [82] C. M. Knoll, „Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen“, Dissertation, Technische Universität München, 2017.
- [83] H. W. Krohne, B. Egloff, C. W. Kohlmann und A. Tausch, „Untersuchungen mit einer deutschen Version der Positive and Negative Affect Schedule (PANAS)“, *Diagnostica*, Bd. 3, Nr. 42, S. 139–156, Jan. 1996. DOI: 10.1037/t49650-000.
- [84] J. Kuhl, D. Evans, Y. Papelis, R. Romano und G. Watson, „The Iowa Driving Simulator“, *Computer*, Bd. 28, Nr. 7, S. 35–41, Juli 1995. DOI: 10.1109/2.391039.
- [85] O. X. Kuiper, J. E. Bos und C. Diels, „Vection does not necessitate visually induced motion sickness“, *Displays*, Okt. 2018. DOI: 10.1016/j.displa.2018.10.001.
- [86] D. Lean, O. H. Gerlach, J. C. Duserberry, F. Erdmann, D. FALCO, W. P. Koevermans, K. J. Staples und J. Vallee, „AGARD Advisory Report No. 144: Dynamic characteristics of flight simulator motion systems“, Bericht Nr. 144, 1979.
- [87] Q. Leclère, N. Roozen und C. Sandier, „On the use of the Hs estimator for the experimental assessment of transmissibility matrices“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, Bd. 43, Nr. 1-2, S. 237–245, Feb. 2014. DOI: 10.1016/j.ymsp.2013.09.008.
- [88] O. H. Levine und R. R. Mourant, „Effect of Visual Display Parameters on Driving Performance in a Virtual Environments Driving Simulator“, in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Okt. 1996. DOI: 10.1177/154193129604002206.
- [89] J.-W. Lin, H. Duh, D. Parker, H. Abi-Rached und T. Furness, „Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment“, in *Proceedings IEEE Virtual Reality*, Orlando, FL, USA, März 2002. DOI: 10.1109/VR.2002.996519.
- [90] P. R. MacNeilage, M. S. Banks, D. R. Berger und H. H. Bülthoff, „A Bayesian model of the disambiguation of gravitoinertial force by visual cues“, *Experimental Brain Research*, Bd. 179, Nr. 2, S. 263–290, Apr. 2007. DOI: 10.1007/s00221-006-0792-0.

-
- [91] R. Mah, L. Young, C. Steele und E. Schubert, „Thresholds for the perception of whole-body linear sinusoidal motion in the horizontal plane“, in *Flight Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Boston, USA, Aug. 1989. DOI: 10.2514/6.1989-3273.
- [92] P. Maier, „Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiven Wahrnehmung von antriebsstrangerregten Fahrzeugschwingungen“, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [93] G. Markkula, R. Romano, R. Waldram, O. Giles, C. Mole und R. Wilkie, „Modelling visual-vestibular integration and behavioural adaptation in the driving simulator“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Juan-les-Pins, Frankreich, Sep. 2018.
- [94] P. Mehnert, *The “Mercedes kitchen” in Sindelfingen: Developing a taste for it!* Adresse: <https://blog.daimler.com/en/2018/04/13/mercedes-benz-kitchen-sindelfingen-taste-design-chef/> (besucht am 08.01.2019).
- [95] G. F. Meyer, S. M. Wuerger, F. Röhrbein und C. Zetzsche, „Low-level integration of auditory and visual motion signals requires spatial colocalisation“, *Experimental Brain Research*, Bd. 166, Nr. 3-4, S. 538–547, Okt. 2005. DOI: 10.1007/s00221-005-2394-7.
- [96] P. Miermeister, M. Lächele, R. Boss, C. Masone, C. Schenk, J. Tesch, M. Kerger, H. Teufel, A. Pott und H. H. Bühlhoff, „The CableRobot simulator large scale motion platform based on cable robot technology“, in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Okt. 2016. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759468.
- [97] H. Mittelstaedt, „A new solution to the problem of the subjective vertical“, *Naturwissenschaften*, Bd. 70, Nr. 6, S. 272–281, 1983. DOI: doi.org/10.1007/BF00404833.
- [98] H. Moosbrugger und A. Kelava, Hrsg., *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*, 2. Aufl. Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20072-4.
- [99] J. D. Moss, J. Austin, J. Salley, J. Coats, K. Williams und E. R. Muth, „The effects of display delay on simulator sickness“, *Displays*, Bd. 32, Nr. 4, S. 159–168, Okt. 2011. DOI: 10.1016/j.displa.2011.05.010.

-
- [100] R. R. Mourant, P. Rengarajan, D. Cox, Y. Lin und B. K. Jaeger, „The Effect of Driving Environments on Simulator Sickness“, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, S. 1232–1236, Okt. 2007. DOI: doi.org/10.1177/154193120705101838.
- [101] T. A. Müller, „Ermittlung vestibulärer Wahrnehmungsschwellen zur zielgerichteten Gestaltung der Fahrzeug-Längsdynamik“, Dissertation, Technische Universität München, 2015.
- [102] H.-J. Negele, „Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung“, Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [103] L. Nehaoua, H. Mohellebi, A. Amouri, H. Arioui, S. Espie und A. Kheddar, „Design and Control of a Small-Clearance Driving Simulator“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 57, Nr. 2, S. 736–746, März 2008. DOI: [10.1109/TVT.2007.905336](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.905336).
- [104] A. Nesti, C. Masone, M. Barnett-Cowan, P. R. Giordano und P. Pretto, „Roll rate thresholds and perceived realism in driving simulation“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2012.
- [105] F. M. Nieuwenhuizen, K. Beykirch, M. Mulder, M. M. Van Paassen, J. L. G. Bonten und H. H. Bülthoff, „Performance measurements on the MPI Stewart platform“, in *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 2008. DOI: [10.2514/6.2008-6531](https://doi.org/10.2514/6.2008-6531).
- [106] F. Panerai, J. Droulez, J.-M. Kelada, A. Kemeny, E. Balligand und B. Favre, „Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Sophia Antipolis, Sep. 2001.
- [107] P. Pfeffer und M. Harrer, Hrsg., *Lenkungsbandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*, 2. Aufl. Springer, 2013. DOI: [10.1007/978-3-658-00977-9](https://doi.org/10.1007/978-3-658-00977-9).
- [108] M. Pinto, V. Cavallo, T. Ohlmann, S. Espié und J. Rogé, „The Perception of Longitudinal Accelerations: What Factors Influence Braking Manoeuvres in Driving Simulators?“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2004.

-
- [109] Plasticportal.net, *Properties of Basotect*. Adresse: https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~en_GB/portal/show/content/products/foams/basotect_properties (besucht am 21.08.2016).
- [110] P. Pretto, A. Nesti und H. Bülthoff, „Variable Roll-rate Perception in Driving Simulation.“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2014.
- [111] P. Pretto, M. Vidal und A. Chatziastros, „Why Fog Increases The Perceived Speed“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Tübingen, 2008.
- [112] V. Punzo und B. Ciuffo, „Integration of Driving and Traffic Simulation: Issues and First Solutions“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Bd. 12, Nr. 2, S. 354–363, Juni 2011. DOI: 10.1109/TITS.2010.2095846.
- [113] D. Purves, Hrsg., *Neuroscience*, 3. Aufl. Sinauer Associates, 2004. DOI: doi.org/10.1212/01.WNL.0000154473.43364.47.
- [114] B. Rasch, M. Frieze, W. Hofmann und E. Naumann, *Quantitative Methoden 1: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*, 4. Aufl., Ser. Springer-Lehrbuch. Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-662-43524-3.
- [115] J. T. Reason, „Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model“, *Journal of the Royal Society of Medicine*, Bd. 71, Nr. 11, S. 819–829, Nov. 1978. DOI: 10.1177/014107687807101109.
- [116] L. D. Reid und M. A. Nahon, „Flight simulation motion-base drive algorithms: part 1. Developing and testing equations“, University of Toronto, Techn. Ber., Dez. 1985.
- [117] G. Reymond, J. Droulez, A. Berthoz und A. Kemeny, „Contribution of a motion platform to kinesthetic restitution in a driving simulator“, in *Proceedings of Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 1999.
- [118] B. Richter, „Beitrag zum Problem der Beschleunigungssimulierung an Fahrsimulatoren“, Dissertation, Technische Universität Berlin, 1971.
- [119] A. Ronellenfitsch, „Entwicklung von Methoden zur Ansteuerung eines längsdynamischen Fahrzeugsimulators“, Technische Universität Darmstadt, Master Thesis, 2016.

-
- [120] M. Roza, M. Wentink und P. Feenstra, „Performance Testing of the Desdemona Motion System“, in *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Aug. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-6472.
- [121] N. R. Ruchika, „Model Predictive Control: History and Development“, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Bd. 4, Nr. 6, S. 3, 2013.
- [122] P. Salamé und A. Baddeley, „Noise, unattended speech and short-term memory“, *Ergonomics*, Bd. 30, Nr. 8, S. 1185–1194, Aug. 1987. DOI: 10.1080/00140138708966007.
- [123] T. J. P. Sammet, „Motion-Cueing-Algorithmen für die Fahrsimulation“, Dissertation, Universität München, 2006.
- [124] J. Sandin, M. Fischer, L. Eriksson, B. Augusto und A. Nocentini, „Effects of sensory cues on perceived simulated speed“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2016.
- [125] R. F. Schmidt und F. Lang, Hrsg., *Physiologie des Menschen*, 30. Aufl. Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-32910-7.
- [126] R. F. Schmidt und H.-G. Schaible, Hrsg., *Neuro-und Sinnesphysiologie*, 5. Aufl. Springer, 2006. DOI: 10.1007/3-540-29491-0.
- [127] S. F. Schmidt und B. Conrad, „Motion drive signals for piloted flight simulators“, Technischer Bericht NASA-CR-1601, Mai 1970.
- [128] A. C. Schütz, J. Billino, P. Bodrogi, D. Polin, T. Q. Khanh und K. R. Gegenfurtner, „Robust Underestimation of Speed During Driving: A Field Study“, *Perception*, Bd. 44, Nr. 12, S. 1356–1370, Dez. 2015. DOI: 10.1177/0301006615599137.
- [129] S. R. Serge und J. D. Moss, „Simulator Sickness and the Oculus Rift: A First Look“, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Bd. 59, Nr. 1, S. 761–765, Sep. 2015. DOI: 10.1177/1541931215591236.
- [130] D. Simon, „Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Bewertung des Anfahrverhaltens von Fahrzeugen“, Dissertation, Universität Rostock, 2010.

-
- [131] A. H. of Simulation, *Early Flight Simulators*. Adresse: <https://www.historyofsimulation.com/early-flight-simulators-2/> (besucht am 05.11.2017).
- [132] S. Skoda, J. Steffens und J. Becker-Schweitzer, „Multisensory interaction—A comparative study on driving sound evaluation in moving base and fixed base driving simulators“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2012.
- [133] D. A. Slutsky und G. H. Recanzone, „Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect“, *Neuroreport*, Bd. 12, Nr. 1, S. 7–10, Jan. 2001.
- [134] A. R. Smith und J. F. Blinn, „Blue screen matting“, in *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1996. DOI: 10.1145/237170.237263.
- [135] S. Soto-Faraco, C. Spence und A. Kingstone, „Cross-Modal Dynamic Capture: Congruency Effects in the Perception of Motion Across Sensory Modalities“, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Bd. 30, Nr. 2, S. 330–345, 2004. DOI: 10.1037/0096-1523.30.2.330.
- [136] F. Soyka, H. Teufel, K. Beykirch, P. Robuffo Giordano, J. Butler, F. Nieuwenhuizen und H. Buelthoff, „Does Jerk Have to be Considered in Linear Motion Simulation?“, in *ALAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, Aug. 2009. DOI: DOI:10.2514/6.2009-6245.
- [137] D. Stewart, „A Platform with Six Degrees of Freedom“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Bd. 1, Nr. 15, 1965.
- [138] A. M. Stratulat, V. Roussarie, J.-L. Vercher und C. Bourdin, „Does tilt/translation ratio affect perception of deceleration in driving simulators?“, *Journal of Vestibular Research*, Nr. 3, S. 127–139, Jan. 2011. DOI: 10.3233/VES-2011-0399.
- [139] A. M. Stratulat, V. Roussarie, J.-L. Vercher und C. Bourdin, „Perception of longitudinal acceleration on dynamic driving simulator“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2012.
- [140] A. Stratulat, V. Roussarie, J.-L. Vercher und C. Bourdin, „Improving the realism in motion-based driving simulators by adapting tilt-translation technique to human perception“, in *Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference*, Singapur, März 2011. DOI: 10.1109/VR.2011.5759435.

-
- [141] L. Suhl und T. Mellouli, *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*, 2. Aufl. Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-3-642-01580-9.
- [142] S. Thein, „Entwicklung eines modellprädiktiven Motion Cueing Algorithmus für einen längsdynamischen Fahrzeugsimulator“, Technische Universität Darmstadt, Master Thesis, 2017.
- [143] H. Van der Steen, „Self-Motion Perception“, Dissertation, Technisch Universität Delft, 1998.
- [144] J. Van Doornik, W. Brems, E. de Vries und R. Uhlmann, „Fahrsimulator mit hoher Plattformperformance und niedriger Latenz“, *Automobiltechnische Zeitschrift*, Nr. 4/2018, 2018.
- [145] VDI, „VDI Richtlinie 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, VDI-Richtlinien, 2004.
- [146] VDI, „Richtlinie 2057 - Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Ganzkörper-Schwingungen“, VDI-Richtlinien, 2007.
- [147] VISATON, *EX 60 S*. Adresse: <http://www.visaton.de/de/produkte/chassiszubehoer/koeperschallwandler/ex-60-s-8-ohm> (besucht am 02. 11. 2016).
- [148] VRODO, *Oculus Rift | News, Tests, Reviews und Kaufberatung*. Adresse: <https://vrodo.de/oculus-rift/> (besucht am 23. 10. 2017).
- [149] M. G. Wade und C. Hammond, „Simulator validation: Evaluating driver performance in simulation and the real world“, University of Minnesota, Technischer Bericht Nr. 28, 1998.
- [150] P. Wagner, C. Zöller, T. Albrecht und H. Winner, „Power, Energy, and Latency Test Drives with the Wheeled Mobile Driving Simulator Prototype“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Stuttgart, Sep. 2017.
- [151] L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, 1. Aufl. Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-1-84882-331-0.
- [152] W. H. Warren, „Self-Motion: Visual Perception and Visual Control“, in *Perception of Space and Motion*, W. Epstein und S. Rogers, Hrsg., Academic Press, 1995, S. 263–325. DOI: 10.1016/B978-012240530-3/50010-9.

-
- [153] D. H. Weir und A. J. Clark, „A Survey of Mid-Level Driving Simulators“, *Journal of Materials & Manufacturing*, Bd. 104, Nr. 5, S. 86–106, Feb. 1995. DOI: doi.org/10.4271/950172.
- [154] A. H. Wertheim, „Motion perception during self-motion: The direct versus inferential controversy revisited“, *Behavioral and Brain Sciences*, Bd. 17, Nr. 2, Juni 1994. DOI: 10.1017/S0140525X00034646.
- [155] M. Wiedemann, „Validierung der Fahrsimulation für das Erleben und Beurteilen fahrdynamischer Eigenschaften“, Dissertation, Technische Universität München, 2016.
- [156] Wiki, *MirrorReflection4*. Adresse: <http://wiki.unity3d.com/index.php/MirrorReflection4> (besucht am 21. 08. 2016).
- [157] H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, Hrsg., *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, 2. Aufl. Vieweg + Teubner, 2012. DOI: 10.1007/978-3-8348-8619-4_1.
- [158] C. Woernle, *Mehrkörpersysteme: Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper*, 2. Auflage. Springer Vieweg, 2016. DOI: 10.1007/978-3-662-46687-2.
- [159] M. Zampini und C. Spence, „The Role of Auditory Cues in Modulating the Perceived Crispness and Staleness of Potato Chips“, *Journal of Sensory Studies*, Bd. 19, Nr. 5, S. 347–363, Okt. 2004. DOI: 10.1111/j.1745-459x.2004.080403.x.
- [160] E. Zeeb, „Daimler’s new full-scale, high-dynamic driving simulator – A technical overview“, in *Proceedings of the Driving Simulation Conference*, Paris, Sep. 2010.
- [161] P. Zeller, Hrsg., *Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*, 2. Auflage. Vieweg + Teubner, 2012. DOI: 10.1007/978-3-8348-8657-6.
- [162] R. Zenk, „Objektivierung des Sitzkomforts und seine automatische Anpassung“, Dissertation, Technischen Universität München, 2008.

-
- [163] S. Zheng, Z. Ye, Z. Yang und J. Han, „The Special Amphibious Vehicle Driving Simulator Design and Development“, in *Spring Congress on Engineering and Technology*, Xian, China, Mai 2012. DOI: 10.1109/SCET.2012.6342093.
- [164] I. M. Zöller, „Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerhaltensvalidität“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2015.