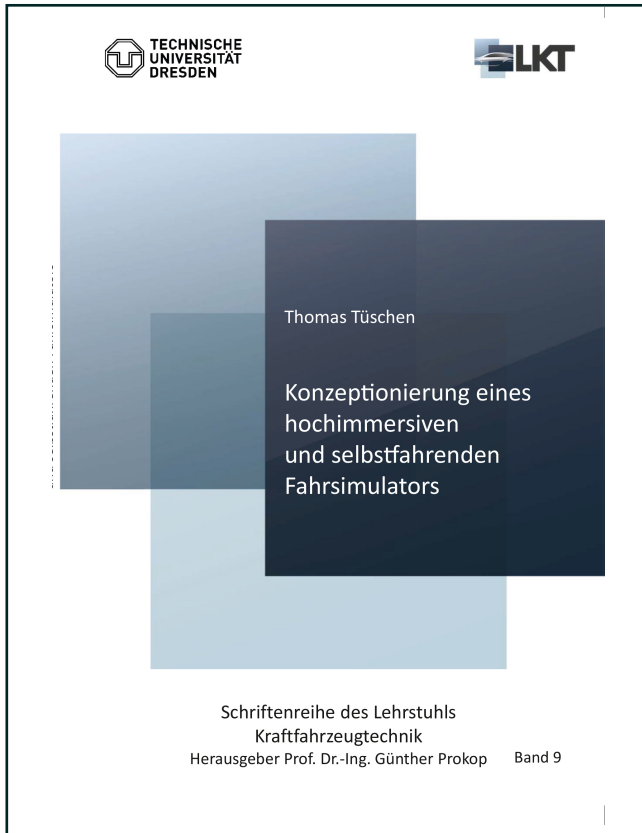




Thomas Tüschén (Autor)
**Konzeptionierung eines hochimmersiven und
selbstfahrenden Fahrsimulators**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7922>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



1 Einleitung

Im einleitenden Kapitel wird eingangs bündig die Anwendung von Fahr simulatoren motiviert sowie deren Darstellungs-grenzen und daraus resultierenden Einschränkungen diskutiert. Auf Basis der Restriktionen von bestehenden Fahr simulatorkonzepten wird die Arbeitshypothese und Zielsetzung der Arbeit abgeleitet. Weiter wird deren zugrundeliegende wissenschaftliche Methodik und Struktur erläutert.

1.1 Motivation

Die gegenwärtige Entwicklung in der Automobilindustrie zeigt u.a. zwei Trends auf: Die Fokussierung auf die Entwicklung von assistierenden und automatisierten Fahrfunktionen (VDA 2015, Bengler et al. 2014) sowie die Virtualisierung des Entwicklungsprozesses (Braess, Seiffert 2012, S. 1257 ff).

Insbesondere assistierende und automatisierte Fahrfunktionen bedürfen neuer Entwicklungs- und Absicherungsmethoden (Winner et al. 2015, S. 123 ff), welche u.a. durch den Einsatz von Fahr simulatoren gestützt werden (Prokop, Köbe 2017, Winner et al. 2015, S. 139). Entgegen der Fahrzeugsteuerung, welche mit steigendem Grad stärker vom Fahrzeug übernommen wird, bedarf die Entwicklung der genannten Fahrfunktionen einer tiefgreifenden Einbindung des Fahrers in den Entwicklungsprozess (Vogelpohl et al. 2016). Während beim vollautomatisierten Fahren (SAE Stufe 5) der Fahrer keine aktive Rolle mehr in der Fahrzeugführung übernimmt, wechselt beim assistierten Fahren (SAE Stufe 2) bis zum vollautomatisierten Fahren die Fahraufgabe zwischen Fahrzeug und Fahrzeugführer (SAE International 2014, VDA 2015). In der ausschließlich softwareseitigen Simulation wird das Fahrerverhalten nur simulativ modelliert (Mai 2017, Prokop 2001). Kritische Übergabeszenarien von automatisierten Fahrfunktionen sind so nicht oder nur unzureichend valide darstellbar (Mai et al. 2015). Hiermit ist der Einsatz von Driver-in-the-Loop Simulation, respektive Fahr simulatoren notwendig. Insbesondere trifft dies auf die funktionale Absicherung von assistierenden und automatisierten Fahrfunktionen zu, für die aktuell neue Absicherungsmethoden entwickelt werden (Prokop, Köbe 2017).

Ferner wird zur Steigerung der Rentabilität sowie zur Kürzung der Entwicklungszeitspanne die Entwicklung des Automobils fortgehend virtualisiert und die Nutzung von Hardware-Prototypen im Entwicklungsprozess reduziert (Büttner 2017). Spätestens zum Entwicklungszeitpunkt, zu dem der wahrnehmbare Einfluss von Komponenten und Systemen des Fahrzeugs auf den Fahrzeuginsassen untersucht werden muss, bedarf es eines Hardware-Prototyps oder alternativ einer virtuellen Driver-in-the-Loop Simulationsumgebung.

Fahr simulatoren bieten, entgegen der ausschließlichen Simulation oder Feldversuchen, die Möglichkeit, Fahr szenarien frei programmierbar, reproduzierbar und sicherheitsunkritisch darzustellen. Somit stellen sie theoretisch, unter Vernachlässigung ihrer physikalischen Einschränkungen, ein optimales Entwicklungswerkzeug dar. Der Grund für die aktuell nicht standardisierte Nutzung von Fahr simulatoren in der Automobilentwicklung kann mit zwei Schwerpunktproblemen angenommen werden: Einerseits die u.U. sehr geringe Immersion¹ und andererseits der Simulator-Sickness (Brooks et al. 2010). Untersuchungen konnten beispielsweise zeigen, dass Probanden, die unter aufkommender Simulator-Sickness litten, ihren Fahrstil unbewusst in Richtung eines angenehmeren Fahrgefühls adaptierten (Domeyer et al. 2013, Sahami, Sayed 2013, Mollenhauer 2004). Daraus wiederum leitet sich die Hypothese ab, dass Ergebnisse von Fahr simulatorstudien durch das unbewusste Fehlverhalten der Probanden u.U. zu falschen Rückschlüssen in der Entwicklung oder Funktionsabsicherung führen (Helman, Reed 2015). Als Annahme kann formuliert werden, dass Ergebnisse von solchen kritischen Fahr simulatorstudien nicht als generell valide eingestuft werden dürfen.

¹ Immersion – Maßgabe bzgl. des Identifizierens mit einer bzw. Eintauchens in eine virtuelle Umgebung (Grau 2003)



Die Fahrsimulatorindustrie adressiert zwar diese Problematik und den Bedarf nach immersiveren Fahrsimulatoren mit zunehmend komplexeren Systemen (Murano et al. 2009, Zeeb 2010, Miermeister et al. 2016, Vi-grade GmbH 2017). Jedoch liegt gerade in Hinblick auf die Bewegungssysteme der Fahrsimulatoren zumeist eine ähnliche Konzeptidee zugrunde, womit ein notwendiger Entwicklungssprung nicht umgesetzt wird und die Anforderungen an Fahrsimulatoren unerfüllt bleiben. Ferner sind aufgrund fehlender Werkzeuge die notwendigen Untersuchungen hinsichtlich der Validität schwierig.

1.2 Arbeitshypothese und Zielsetzung

Gegenwärtig erwerbbar Fahrsimulatorsysteme genügen in Bezug auf den möglichen Bewegungsraum nicht den Anforderungen einer optimalen Bewegungskonstruktion (Betz 2015, S. 21 f, Tüschen, Prokop 2017, Olivari et al. 2017). Dies begründet sich primär aus dem eingeschränkten Bewegungsraum der Fahrsimulatoren. Diese sind hinsichtlich ihrer maximalen translatorischen und rotatorischen Amplituden sowie Dauer der darzustellenden Beschleunigungen aufgrund des Arbeitsraums stark eingeschränkt. Das kann zu Fehlbewegungen (False Cues (P. R. Grant 1996)) des Fahrsimulators führen und damit dem Probanden ein widersprüchliches Bild zur antizipierten Fahrdynamik geben, was wiederum zur Simulator-Sickness führen kann (Drexler et al. 2004, Kolasinski 1995, Brooks et al. 2010).

Ein dynamischer Fahrsimulator mit einem theoretisch unbegrenzten Bewegungsraum ermöglicht es hingegen, Untersuchungen uneingeschränkt durchzuführen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die konzeptionelle Ausarbeitung eines neuartigen Bewegungssystems für Fahrsimulatoren, welches einen virtuell unbegrenzten Bewegungsraum besitzt. Basis der Arbeit ist die Konzeptidee eines auf Rad-Boden-Kontakt basierenden, selbstfahrenden Fahrsimulators (Donges 2001). Diese Konzeptidee soll auf ihre konzeptionelle Umsetzbarkeit untersucht und zur Konzeptionsreife weiterentwickelt werden. Die Konzeptreife beinhaltet die Entwicklung eines Hardwarekonzepts und Ansteuerungsalgorithmus sowie den Nachweis derer Funktionalität.

1.3 Methodik und Strukturierung der Arbeit

Die Methodik zur Umsetzung des selbstfahrenden Fahrsimulatorkonzepts bzw. die Strukturierung der Arbeit ist wie folgend dargestellt gegliedert. Dem geht ein fahrsimulatorspezifisches Grundlagenkapitel (Kapitel 2) voran.

1. Stand der Technik und Anforderungsanalyse (Kapitel 3, 4)

Analysiert werden die Anwendungsgebiete von Fahrsimulatoren in der Automobilentwicklung. Hieraus wird ein repräsentatives Spektrum von Fahrmanövern abgeleitet, welches die herkömmliche Nutzung von straßen zugelassenen Pkw abdeckt. In einer Fahrdynamiksimulation werden folgend die für das Bewegungssystem von Fahrsimulatoren als kritisch identifizierten Fahrmanöver modelliert und daraus die Anforderungen an ein optimales Bewegungssystem von Fahrsimulatoren abgeleitet. Dem werden Bewegungssysteme von bestehenden exemplarischen Fahrsimulatoren gegenübergestellt sowie deren Anforderungsdefizite identifiziert.



2. Auslegung des selbstfahrenden Fahrsimulators (Kapitel 5, 6)

Die grundlegende Konzeptidee des selbstfahrenden Fahrsimulators wird bzgl. der identifizierten Anforderungen analysiert. Verglichen mit bestehenden Bewegungssystemen liegt die Kernproblematik in der Umsetzung eines selbstfahrenden Systems im Rad-Boden Kontakt. Zur Lösung dieser Problematik wird die der Arbeit zugrundeliegende Konzeptidee entsprechend weiterentwickelt sowie ein Bewegungskonzept entworfen. Folgend wird das Bewegungssystem des selbstfahrenden Fahrsimulators den identifizierten Anforderungen entsprechend aufgebaut. Zur Verifizierung des Konzepts dient ein Mehrkörpersystem-Modell, welches die Grundlage für weitere Untersuchungen ist.

3. Funktionskette des selbstfahrenden Fahrsimulators (Kapitel 7, 8)

Zur Ableitung konkreter Hardwareparameter des Bewegungssystems, wie Energie-/Leistungs-/Bewegungsraumbedarf, wird eine Funktionskette von Ansteuerungsalgorithmen entwickelt, den gestellten Anforderungen gegenübergestellt und am Mehrkörpersystem-Modell appliziert. Die Entwicklung des Ansteuerungsalgorithmus erfolgt unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung sowie der Bewegungsalgorithmen bestehender Fahrsimulatoren. Die Verifizierung der Beschleunigungsdynamik erfolgt anschließend in der geschlossenen Funktionskette.

4. Sicherheitskonzept (Kapitel 9)

Im Gegensatz zu bestehenden Fahrsimulatorsystemen besitzt das Konzept des selbstfahrenden Fahrsimulators keine feste Bindung zu seinem Bewegungsraum. Dies ermöglicht einerseits eine unbegrenzte Bewegungsfreiheit, aber andererseits muss der Fahrsimulator jederzeit aktiv in einen sicheren Zustand überführbar sein. Dazu ist die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts notwendig, das selbst in Notsituationen den Simulator, ohne Gefährdung des Probanden, stillsetzt. Die grundlegenden Anforderungen für dieses spezielle Sicherheitskonzept werden identifiziert, Lösungen entwickelt und das Verletzungspotenzial des Probanden untersucht.



2 Stand der Forschung

Die Zielsetzung von Fahrsimulatoren ist ein möglichst immersiver Eindruck der virtuellen Realität. Dabei steht der Mensch bzw. seine Wahrnehmung der simulierten Umgebung im Fokus der Simulatorfunktionalität. Grundlage einer Fahrsimulatorenentwicklung ist damit das Verständnis der Bewegungswahrnehmung des Menschen, welche folgend behandelt wird. Des Weiteren werden die Funktionsweise von Fahrsimulatoren sowie fahrsimulatorspezifische Fachtermini erläutert.

2.1 Bewegungswahrnehmung

Der Mensch nimmt Informationen über seine Orientierung, Geschwindigkeit sowie Beschleunigung im Raum über unterschiedliche Wahrnehmungssysteme wahr. Aus der Kombination der einzelnen und gewichtet wahrgenommenen Stimuli, leitet er daraufhin seine Eigenbewegung im Raum ab. Das Bewegungssystem eines Fahrsimulators stimuliert dabei primär die vestibuläre sowie somatosensorische Wahrnehmung.

2.1.1 Wahrnehmungssysteme

Die Orientierung und Bewegung im Raum nimmt der Mensch über die folgenden Wahrnehmungssysteme wahr (Fischer 2009, S. 8):

- visuelles System (Auge)
- auditives System (Ohr)
- somatosensorisches System (Haut, Muskeln, Gelenke, Sehnen)
- vestibuläres System (Gleichgewichtsorgan)

Tabelle 2.1: Wahrnehmungskanäle (Tiesler 1973, Advani et al. 2002)

	Auslösender Reiz	Rezeptor	Wahrgenommene Größe
Translation	Eigenbewegung	vestibulär	Beschleunigung
	Eigenbewegung	propriozeptiv	
	Bildänderung	visuell	Geschwindigkeit
	Vibrationen	somatosensorisch	
	Geräusche	auditiv	
	Bild	visuell	
Rotation	Eigenbewegung	vestibulär	Drehbeschleunigung
	Eigenbewegung	vestibulär	Drehgeschwindigkeit
	Bildänderung	visuell	Orientierung
	Bild	visuell	
	Körperlage	propriozeptiv	



Dabei beschreibt nicht ein System eindeutig die Orientierung und Bewegung im Raum, sondern die einzelnen Signale werden im Gehirn gewichtet zu einer kombinierten Gesamtwahrnehmung zusammengeführt (van der Steen, Franciscus Albertus Martinus 1998, S. 23 ff). Tabelle 2.1 führt auf, über welchen Rezeptor welche Größe wahrgenommen wird. Im Vergleich zu anderen Wahrnehmungsquellen gilt die visuelle Wahrnehmung allgemein als zuverlässiger (Butler et al. 2006) und es wird z.B. angenommen, dass im Kontext der Fahrzeugführung der Sehsinn approximativ ca. 90 % aller führungsrelevanten Größen aufnimmt (Schlag et al. 2008, Crundall et al. 2003). Jedoch werden die für das Bewegungssystem eines Fahrsimulators relevanten Beschleunigungen nicht visuell, sondern durch das somatosensorische und vestibuläre System wahrgenommen.

Grundsätzlich bedeutet das für die Bewegungswahrnehmung des Menschen, dass Diskrepanzen in den Bewegungsstimuli vom Gehirn über quasi redundante Wahrnehmungssysteme kompensiert werden können. Wiederum kann es bei einer zu großen Unstimmigkeit einzelner Bewegungsinformationen, z.B. aufgrund einer Asynchronität der Signale, zu einem Unwohlsein bis hin zu einem Übelkeitsgefühl (Simulator-Sickness) kommen. (Fischer 2009, S. 8)

2.1.2 Vestibuläre Wahrnehmung

Das Vestibularorgan (ugs. Gleichgewichtsorgan) ist für die vestibuläre Wahrnehmung verantwortlich und sitzt im Innenohr des Menschen (Abbildung 2.1). Es setzt sich im Wesentlichen aus den Bogengängen und den Otolithen, bestehend aus den Kammern (Macularorgane) Utriculus und Sacculus, zusammen. (Purves et al. 2004, S. 315 ff)

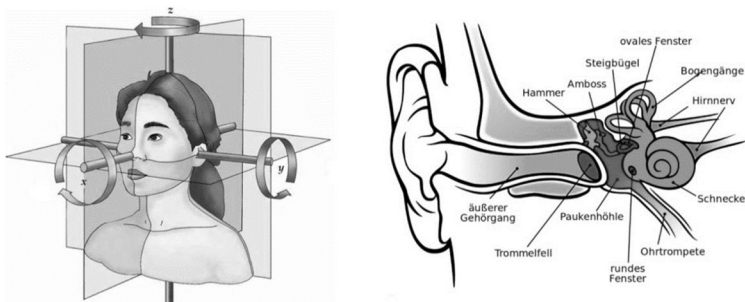


Abbildung 2.1: Sitz des Vestibularorgans (Purves et al. 2004, S. 315 ff)

Die drei orthogonal zueinander liegenden Bogengänge sind mit einer viskosen Flüssigkeit (Endolymphe) gefüllt, an die sich jeweils eine Ampulle anschließt. In dieser wiederum sitzen feine Haare, welche in einen Gallertkegel (Cupula) ragen. Aufgrund der Trägheit der Flüssigkeit führt eine Drehbeschleunigung des Kopfes dazu, dass diese an den Wänden der Bogengänge vorbeiströmt (Abbildung 2.2). Diese Relativbewegung gegenüber dem Bogengang regt wiederum in den Ampullen sitzende Cupula an, welche von einer viskosen Flüssigkeit umströmt wird. Die mit Hilfe der Sinneshärchen wahrgenommene Bewegungsinformation der Flüssigkeit wird dann an das Gehirn weitergeleitet, welches die Information als Drehbewegung interpretiert. (Purves et al. 2004, S. 315 ff)

Aufgrund des stark gedämpften Tiefpassverhaltens der strömenden Flüssigkeit nimmt der Mensch Drehbewegungen mit Frequenzen größer als 0,1 Hz als Drehgeschwindigkeit und nicht als Drehbeschleunigung wahr. (Benson et al. 1989)

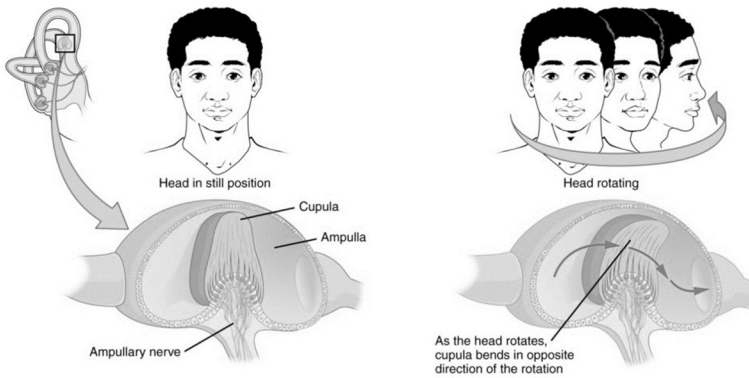


Abbildung 2.2: Funktion Vestibularorgan: rotatorische Beschleunigungen (OpenStax et al. 2013, S. 612)

Translatorische Beschleunigungen werden durch die zwei senkrecht zueinanderstehenden Organe Sacculus und Utriculus (Maculaorgane) wahrgenommen (Abbildung 2.1). Jedes Maculaorgan wiederum kann zwei orthogonal zueinander angeordnete Beschleunigungen wahrnehmen. Im Gegensatz zur Cupula enthält die gallertartige Membran der Maculaorgane Otolithen (Statolithen), welche eine Art Kalziumkristalle sind. Durch die zusätzlichen Otolithen erhöht sich die Masse der Gallertmembran. Bei wirkenden Beschleunigungen tritt somit ein Trägheitseffekt auf, welchen der Mensch analog zu den Bogengängen wahrnehmen kann. Dabei befindet sich die Gallertmembran bei ausschließlich wirkender Schwerkraft in Ruhelage. (Purves et al. 2004, S. 315 ff)

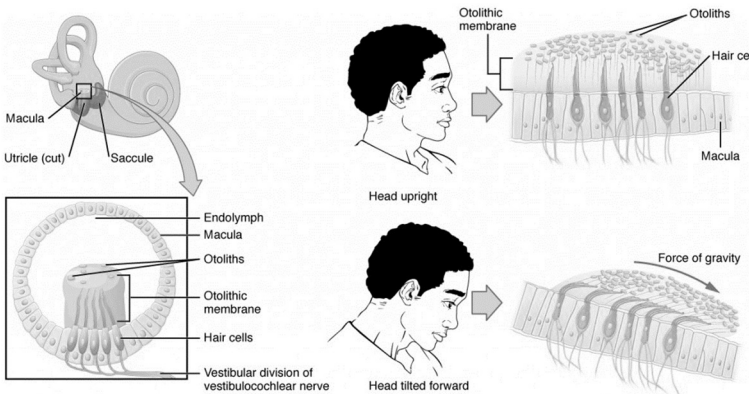


Abbildung 2.3: Funktion Vestibularorgan: translatorische Beschleunigungen (OpenStax et al. 2013, S. 613)

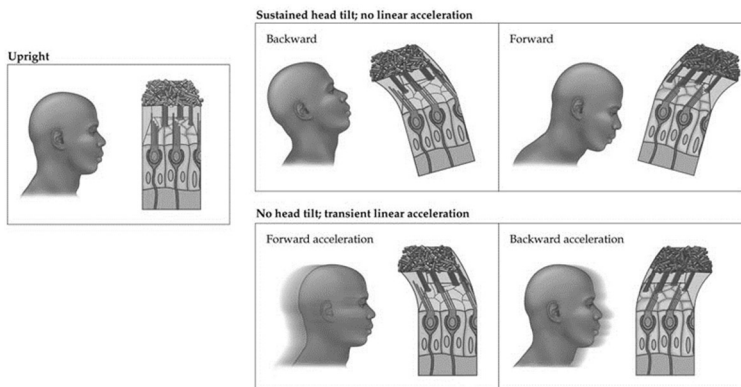


Abbildung 2.4: Fehlinterpretation des Vestibularorgans (Purves et al. 2004, S. 315 ff)

Begründet auf dem Wahrnehmungsprinzip von translatorischen Beschleunigungen über die Maculaorgane hat das Vestibularorgan eine Wahrnehmungsschwäche. Die einen Wahrnehmungsreiz auslösende Kraft setzt sich vektoriell zusammen aus dem Anteil der Gravitationskraft und der aus der translatorischen Beschleunigung resultierenden Kraft. Beispielhaft erklärt, kann der Mensch nicht eindeutig eine quasi stationäre Nickbewegung des Kopfes von einer Längsbeschleunigung unterscheiden (Abbildung 2.4). (Fischer 2009, S. 10)

Dem Vestibularorgan ist es nicht eindeutig möglich, Neigungswinkel um die Quer- und Längsachse von translatorischen Beschleunigungen zu differenzieren.

2.1.3 Wahrnehmungsschwellen

Neben der bereits beschriebenen Schwäche des Vestibularorgans hat die Güte der menschlichen Bewegungswahrnehmung noch weitere Einschränkungen, welche für den Betrieb von Simulatoren genutzt werden. Insbesondere die Wahrnehmungsschwellen, ab denen der Mensch überhaupt eine Beschleunigung eindeutig identifizieren kann, spielen eine wichtige Rolle.

Da der Mensch jedoch kein deterministisches System ist und die Sinnesorgane in Abhängigkeit von Alter, Krankheit und weiteren Faktoren unterschiedlich gut funktionieren, können die Wahrnehmungsschwellen nicht als allgemeingültig angenommen werden. Zudem sind die Parameter der Untersuchungen (z.B. mit/ohne Visualisierung; Typ und Frequenz des Beschleunigungsimpulses; parallele kognitive Auslastung) zur Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen variabel, womit eine exakte Vergleichbarkeit der Untersuchungen nicht gegeben ist. Tabelle 2.2 zeigt die sehr unterschiedlichen Ergebnisse von Untersuchungen im Bereich der Wahrnehmungsschwellen von Beschleunigungen.

Tabelle 2.2: Schwellen der menschlichen Bewegungswahrnehmung auf Basis (Fischer 2009, S. 14, Betz 2015, S. 16)

	Translatorische Beschleunigungen [m/s^2]			Rotatorische Geschwindigkeiten [$^\circ/\text{s}$]			Rotatorische Beschleunigungen [$^\circ/\text{s}^2$]		
	\ddot{x}	\ddot{y}	\ddot{z}	$\dot{\phi}$	$\dot{\theta}$	$\dot{\psi}$	$\ddot{\phi}$	$\ddot{\theta}$	$\ddot{\psi}$
(Mc Connell 1957)	0,18			5			2		
(B. Clark, Stewart 1962)							4		
(Fogel 1963, S.10 f)	0,2								
(Richter 1971, S. 13 f)							5,73		
(Durth 1974)	0,18			12			6		
(Reid, Nahon 1985)	0,17	0,17	0,28	3,0	3,6	2,6			
(Nahon, Reid 1990, Nordmark 1994, Groen, Bles 2004)				3,0					
(Reymond et al. 1999)				2,04			0,3		
(Reymond, Kemeny 2000)	0,05						0,3		
(Groen, Bles 2004)				2-4					
(Wentink et al. 2008, Colombet et al. 2015)				6					
(Nesti et al. 2012, Pretto et al. 2014)				~6					
(Fang et al. 2014)				5-7					

Trotz unterschiedlicher Versuchsvariablen und Wahrnehmungsdiskrepanzen individueller Versuchspersonen, konnte eine für den Einsatz von Fahrsimulatoren allgemein anerkannte Wahrnehmungsschwelle für rotatorische Geschwindigkeiten von $\sim 6^\circ/\text{s}$ identifiziert werden (siehe Tabelle 2.2). Weiterführend wird daher in der Arbeit die Schwelle mit $6^\circ/\text{s}$ angenommen.

2.2 Fahrsimulatorspezifische Grundlagen

Das folgende Subkapitel behandelt die allgemeine Funktionsstruktur von Fahrsimulatoren und führt in die fahrsimulatorspezifischen Funktionen und deren Fachtermini ein.

2.2.1 Funktionsweise Fahrsimulator

Die grundlegende Aufgabe eines Fahrsimulators ist die möglichst naturalistische Nachbildung der auf den Menschen wirkenden Stimuli des simulierten Fahrzeugs. Eine Definition bzw. Normierung, welche Darstellungsmöglichkeiten und -güte ein Fahrsimulator aufweisen muss, existiert nicht.

Eine allgemein gehaltene Wirkstruktur eines Fahrsimulators ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Sie beinhaltet den Fahrer bzw. Probanden, die zugrundeliegende Fahrzeug-/Umweltsimulation sowie die Fahrsimulatorstruktur. Diese wiederum ist in die folgenden Darstellungssysteme gegliedert: Visualisierungs-, Audio- und Bewegungssystem.

Ohne Berücksichtigung von potenziellen Latenzzeiten einzelner Systeme ist der schematische Signalfluss wie folgt gegliedert:

t_1 ... Fahrer Input

t_2 ... Aufnahme/Verarbeitung Fahrereingabe und Übergabe an Fahrzeug-/Umweltsimulation

t_3 ... Simulation des Ego-Fahrzeugverhaltens, der Umwelt und Übergabe der Informationen an Bewegungssystem

t_4 ... Umsetzung der Darstellungsinformationen und Wahrnehmung durch Fahrer

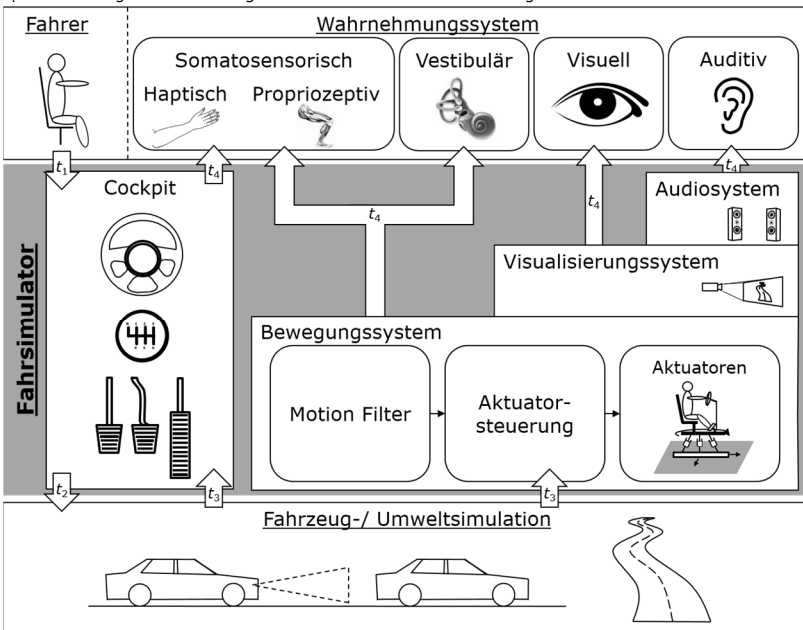


Abbildung 2.5: Funktionsprinzip Fahrsimulator

Ein Fahrsimulator kann sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Die darstellenden Systeme können einerseits konzeptionell unterschiedlich umgesetzt sein (z.B. Visualisierung: Projektoren; Bildschirme; Head-mounted-Displays), andererseits auch teilweise oder komplett entfallen.

Insbesondere das Bewegungssystem stellt eine große Divergenz bei Fahrsimulatoren dar. Es wird hierbei zwischen statischen (ohne Bewegungssystem) und dynamischen Fahrsimulatoren (mit Bewegungssystem) unterschieden.

2.2.2 Tilt-Coordination

Die Tilt-Coordination beschreibt eine Technik im Bereich der Simulatoren, welche auf dem in Kapitel 2.1.2 beschriebenen vestibulären Unvermögen, der Differenzierung von translatorischen Beschleunigungen und quasi stationären Drehbewegungen des Kopfs unter Wirkung der Schwerkraft, beruht. Wird der Proband im Simulator (inkl. virtuellem Horizont der Visualisierung) um den Winkel ϑ_{Tilt} geneigt, hat die Gravitationsbeschleunigung g eine wirkende x und z Komponente (Abbildung 2.6), welche sich zu $\ddot{x}_{\text{Tilt}} = g \cdot \sin \vartheta_{\text{Tilt},x}$; $\ddot{z}_{\text{Tilt}} = -g \cdot \cos \vartheta_{\text{Tilt},x} \approx -g^2$ ergeben. Die Neigung des Kopfes wird demnach als translatorische Beschleunigung interpretiert. Dies gilt bei einem Tilt-Winkel $\vartheta_{\text{Tilt},y}$ analog in y -Richtung.

MITTELSTÄDT (Mittelstaedt 1983) schränkt diesen Effekt aber bis zu $\vartheta_{\text{Tilt,max}} = \pm 20^\circ \dots 30^\circ$ Neigungswinkel (bzw. $\ddot{x}_{\text{Tilt}}, \ddot{y}_{\text{Tilt}} = \pm 0,34g \dots 0,5g$) ein, da der Mensch darüber hinaus die Reduzierung der wirkenden Beschleunigung zur Körperhochachse zu ausgeprägt gegenüber der Tilt-Beschleunigung wahrnimmt. Eine weitere Einschränkung ist die Wahrnehmungsschwelle der durch die Bogengänge wahrgenommenen Neigungsgeschwindigkeit des Kopfes. Damit der Proband die Tilt-Coordination vordergründig als translatorische Beschleunigung wahrnimmt, muss die Neigungsgeschwindigkeit unterhalb ihrer Wahrnehmungsschwelle bleiben. Unter Berücksichtigung der Wahrnehmungsschwelle von $\dot{\vartheta}_{\text{Tilt,max}} = 6^\circ/\text{s}$ (Kapitel 2.1.3) ergibt sich eine maximale Änderung der Tilt-Coordination-Beschleunigung von $\ddot{x}_{\text{Tilt,max}} = \pm g \cdot \sin(6^\circ) \frac{1}{\text{s}} \approx \pm 1 \text{ m/s}^3$ (analog $\ddot{y}_{\text{Tilt,max}}$).

In Fahrsimulatoren erfährt der Mensch bei der Tilt-Coordination keinen visuellen Eindruck seiner Neigung. Wenn die Neigungsgeschwindigkeit oberhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt, besteht die Annahme, dass ein Resultat der widersprüchlichen Wahrnehmungsinformationen ein Unwohlsein bzw. Simulator-Sickness ist.

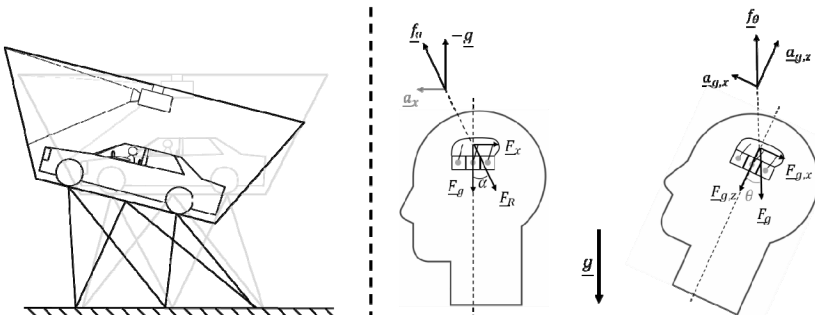


Abbildung 2.6: Funktion Tilt-Coordination (Abbildung rechts nach (Fischer 2009, S. 11))

² Annahme: kleine Winkel