

2 Stand der Technik und Grundlagen

Der steigende Innovationsgrad in der Fahrzeugtechnik führt zunehmend zu komplexen und verteilten Systemen. Es werden verstärkt Komponenten von verschiedenen hochspezialisierten Partnern zu einem Gesamtsystem integriert. Daher gewinnen Integration und Test verteilter Systeme zunehmend an Bedeutung. [22]

Neben Werkzeugen, die es ermöglichen mit White- oder Blackbox-Tests² [23] Software zu überprüfen, können in einem Fahrsimulator Untersuchungen in einer realitätsnahen Umgebung unter Einbindung des Fahrers durchgeführt werden.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick, welche technologischen und physikalischen Möglichkeiten bestehen, um das Potenzial eines Fahrsimulators als Entwicklungswerkzeug nutzen zu können. Dabei wird neben verschiedenen Bauformen von Fahrsimulatoren auf deren Wirkung bezüglich menschlicher Wahrnehmung, regelungstechnische Hintergründe sowie klassische Ansätze zur Ansteuerung von Bewegungsplattformen eingegangen.

2.1 Fahrsimulatoren

2.1.1 Entwicklung dynamischer Simulatoren

Der Einsatz von Simulatoren, die eine Interaktion des Menschen mit einem dynamischen System ermöglichen, ist in der Flugbranche am weitesten verbreitet. Die erste Anlage, welche als Flugsimulator bezeichnet werden kann, ist ein Gerät zum Training im Umgang mit einem Eindecker des französi-

² Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad der Information über die zu untersuchende Komponente [22].

schen Flugzeugherstellers Antoinette (ca. 1910) [24]. Getrieben durch den ersten Weltkrieg wurden weitere Trainingsgeräte entwickelt. In Deutschland stand auf dem Militärflughafen Döberitz nahe Berlin ab ca. 1915 eine Anlage zur Ausbildung von hinter dem Piloten sitzendem Personal. Durch das Training im Simulator sollte die Gefahr des aus der Maschine geschleudert Werdens bei unerwarteten Flugzeugbewegungen minimiert werden [25]. Ab ca. 1930 konnte mit dem Link-Trainer die Pilotenausbildung mit einem Simulator signifikant unterstützt werden [26]. Dieser konnte mit einem vakuumbetriebenen System Eindrehen, Steigen und Sinken von Flugzeugen nachbilden und verfügte über eine geschlossene Kabine, womit das Trainieren des Instrumentenfluges möglich wurde.

Mit der fortschreitenden Verbesserung der Technologie werden Flugsimulatoren zunehmend auch in der zivilen Luftfahrt eingesetzt. Teile der Pilotenausbildung und Schulungen für neue Flugzeugtypen finden heute in Simulatoren statt. Darüber hinaus wird das Kabinenpersonal auf Ernstfälle in bewegten Simulatoren vorbereitet [27] sowie Astronauten mit Simulatoren auf die hohen auftretenden Beschleunigungen bei einem Raumflug vorbereitet [28]. Diese Technologie wird ebenfalls für Jet-Piloten angewandt.

Neben den erwähnten Anwendungen aus Luftfahrt und Militär diffundierten bewegte Simulatoren in weitere Branchen, wie bspw. in die Schifffahrt [29] und in die Fahrzeugbranche.

Als erster bewegter Fahrsimulator kann der Volkswagen Fahrsimulator bezeichnet werden, welcher 1974 in Betrieb ging [30]. Mitte der achtziger Jahre nahmen Daimler und VTI als erste Forschungseinrichtung ihre bewegten Fahrsimulatoren in Betrieb [4,31]. Fahrsimulatoren setzen sich in den letzten Jahren mehr und mehr durch, aktuell sind weltweit ca. zwölf high-level Systeme³ in Betrieb. Eine Auflistung findet sich in [32]. Durch verschiedene Ausbaustufen und Komplexitäten und ein breites Spektrum von Einsatzgebieten steigt deren Zahl weiter. Neben der Forschung und Entwicklung von Fahrzeugen werden diese inzwischen auch von der Unterhaltungsindustrie

³ Simulatoren mit großem linearen Bewegungsraum [34].

als Komplettsystem, z. B. zu Demonstrationszwecken für Kunden oder als aufwändige Rennsimulation, verkauft [33].

2.1.2 Bauformen und Beispiele

Ausgehend von den oben beschriebenen Entwicklungen sind unterschiedliche Bauformen von Bewegungsplattformen entstanden. Dabei gibt es verschiedene Konzepte sowie Derivate dieser, welche sich in Größe und Dynamikmöglichkeiten unterscheiden. Getrieben werden diese Unterschiede hauptsächlich von geplanten Anwendungen sowie durch die zur Verfügung stehenden Platz- und Budgetverhältnisse.

Die am weitesten verbreitete Bauform eines Bewegungssystems basiert auf der parallelkinematischen Form des Hexapoden-Prinzips. Diese Systeme gehen auf die von Eric Gough für die Dunlop Rubber Co. entwickelte Testeinrichtung für Flugzeugreifen zurück. Für die Positionierung der Plattform bietet dieser sechs Freiheitsgrade. Ab den 1960er-Jahren wurde von Klaus Cappel und Edward Steward der Hexapod als Bewegungsplattform für Flug- und Helikoptersimulatoren eingesetzt [35]. Der Hexapod ist in der Flugbranche nach wie vor die am weitesten verbreitete Bewegungsplattform.

Hexapoden als Baumuster finden sich in verschiedenen Varianten und Größen an vielen Entwicklungszentren und Forschungseinrichtungen in der Automobilbranche. Der Dynamische Fahrsimulator der BMW Group [36], der Dynamische DLR-Fahrsimulator SimCar [37,38] und der Cruden Hexatech F1 Simulator [39] seien an dieser Stelle beispielhaft genannt.

Während die Bewegungsmöglichkeiten eines Hexapods für die Roll-, Nick- und Hubbewegungen von Fahrzeugen meist ausreichen, kommt er bei den auftretenden linearen Längs- und Querbeschleunigungen sowie der Gierbewegung häufig an seine Grenzen. So wird bspw. bei einem Spurwechsel in der Realität ein großer Weg in Fahrzeugquerrichtung zurückgelegt, welchen ein Hexapod nicht erreichen kann. Daher werden Hexapoden häufig durch Schlittensysteme erweitert, um einen größeren linearen Arbeitsraum zu ermöglichen.

Bei Abbiegevorgängen ändert sich die Bewegungsrichtung des Fahrzeuges signifikant. Um hier Verbesserungen zu erzielen, werden zusätzliche Gier-tische an Hexapoden installiert. Der dynamische Fahrsimulator der Daimler AG verfügt bspw. über eine zusätzliche hochdynamische Schiene. Diese kann durch einen stationären 90°-Giertisch innerhalb des Domes entweder für Längs- oder Querbeschleunigungen genutzt werden [40,41]. Der Toyota Fahrsimulator verfügt dagegen sowohl über ein XY-Schlittensystem als auch über einen Giertisch, welcher während der Simulation verwendet werden kann [42].

Neben den oben beschriebenen Möglichkeiten lassen sich Erweiterungen des linearen Arbeitsbereiches sowie des Gierwinkels auch durch Kombination eines Hexapods mit einem Tripod erzielen. Die Firma VI-Grade hat ein solches System entwickelt. Beide Bewegungssysteme sind hochdynamisch und ermöglichen die Simulation eines Fahrzeuges im Grenzbereich [43].

Neben dem Einsatz von Hexapoden werden auch andere Arten von Bewegungssystemen zur Fahrsimulation verwendet. Diese Simulatoren dienen dabei nicht ausschließlich der Fahrsimulation, sondern werden auch für andere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eingesetzt. Stellvertretend für die zunehmende Zahl an Industrierobotern sei an dieser Stelle der CyberMotion Simulator des Max-Planck-Instituts für biologische Kybernetik genannt. Dieses System wurde um zwei weitere Freiheitsgrade ergänzt und wird u. a. zur Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Bewegungswahrnehmung eingesetzt [44].

Ein System, welches eine neue Art von Bewegungsplattform durch Ausnutzen des Prinzips einer Zentrifuge in Kombination mit mehreren linearen Freiheitsgraden und einer kardanischen Aufhängung nutzt, ist der Desdemona-Simulator. Dieses System wird neben der Fahrsimulation auch für militärische und zivile Flugsimulation, Raumfahrttraining sowie als Schiffssimulator eingesetzt [45].

Die bisher beschriebenen Bewegungssysteme dienen hauptsächlich der Darstellung von vergleichsweise niederfrequenten und großen Fahrzeugbewegungen. Darüber hinaus entstehen, bspw. durch Fahrbahnanregungen, auch höherfrequente Anteile. Diese werden häufig durch Shaker oder weitere Ak-

tuatoren als zusätzliche Freiheitsgrade nachgebildet. Der National Advanced Driving Simulator in Iowa kann zusätzlich das in der Simulorkuppel befindliche Fahrzeug an den vier Aufnahmepunkten um $0,5\text{ cm}$ bewegen [46]. Einfacher und nachrüstbar ist dagegen die Lösung mit einem Shaker im Fahrzeug, z. B. im Bereich des Fahrersitzes.

An den beschriebenen Beispielen wird deutlich, dass sich die Simulation eines Fahrzeuges unter Interaktion mit dem Fahrer zunehmend durchsetzt. Dabei entwickeln sich zum Teil völlig unterschiedliche Ansätze von Bewegungsplattformen. Die Systeme werden auch während ihres Betriebes fortwährend weiterentwickelt und erweitert.

2.1.3 Der Stuttgarter Fahrsimulator

Der in Abbildung 2.1 dargestellte Stuttgarter Fahrsimulator wurde 2012 in Betrieb genommen. Er wurde in Zusammenarbeit von FKFS und der Universität Stuttgart mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung sowie des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg errichtet. Bei der Auslegung des Stuttgarter Fahrsimulators lag der „sportliche Normalfahrer“, dessen genutztes Spektrum von Längs- und Querschleunigungen in einer Probandenstudie ermittelt wurde, im Fokus [47]. Aufgrund dieser Auslegung können mit dem Stuttgarter Fahrsimulator verschiedenste Anwendungen untersucht werden.



Abbildung 2.1: Außen- und Innenansicht des Stuttgarter Fahrsimulators

Bei der Konzeption des Simulators wurde großer Wert auf Flexibilität und Modularität gelegt. So ist es nun möglich, sowohl Soft- als auch Hardwarekomponenten des Simulators auszutauschen und diese im neuen Verbund zu betreiben. Auf einige Teilsysteme wird an dieser Stelle eingegangen.

Das Visualisierungssystem des Simulators besteht aus insgesamt zwölf Kanälen. Mit neun Projektoren wird eine durchgehende 240° Frontprojektion erzeugt, jeweils ein Bildkanal wird für die Darstellung der Rückspiegelansichten verwendet. Eine am Institut entwickelte Geräuschsimulation stellt die Eigengeräusche des Fahrzeuges sowie die Umgebungskulisse nach. Zur Geräuschpositionierung werden Lautsprecher innerhalb des Fahrzeuges und der Kuppel verwendet.

Die aus Kohlefaser- und Aluminium-Verbundwerkstoffen bestehende Simulatorkuppel bietet mit einem Durchmesser von $5,4\text{ m}$ Platz für ein vollständiges Fahrzeugmockup. Dieses Mockup kann über eine Fahrzeugwechseleinrichtung ausgetauscht werden. Um eine schnelle Inbetriebnahme zu gewährleisten, werden standardisierte elektrische und mechanische Schnittstellen genutzt. Die umgebauten Fahrzeuge verfügen über verschiedene Module, wie z. B. haptische Aktuatoren [48] und verschieden ausgelegte Lenkungssimulationen.

Das Bewegungssystem besteht aus einem XY-Schlittensystem und einem darauf installierten Hexapod. Der Aufbau entspricht somit dem oben beschriebenen Prinzip der Erweiterung des linearen Arbeitsraumes. Das Gesamtsystem verfügt über eine Nutzlast von 4 t . Die dynamischen sowie statischen Grenzen des Systems sind in Tabelle 2.1 angegeben [49].

Die Simulationsumgebung des Simulators stellt permanent Daten des Fahrzeuges, dessen aktueller Umgebung und Daten für die vorausliegende Strecke bereit. Auf dem standardisierten OpenDRIVE [50] Format beruht die Streckenbeschreibung. Die Vorausschaudaten werden diskret über dem Streckenverlauf angegeben. Eine Beschreibung der beiden Formate erfolgt in Kapitel 5.1.

Tabelle 2.1: Statische und dynamische Grenzen des Bewegungssystems [51]

Teilsystem	Freiheits-grad	Bewegungsraum		Geschwin-digkeit	Beschleunigung
XY-Schlitten	x_{XY}	5 m	-5 m	$\pm 2,0 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
	y_{XY}	3,5 m	-3,5 m	$\pm 3,0 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
Hexapod	$x_{Hex.}$	0,538 m	-0,453 m	$\pm 0,5 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
	$y_{Hex.}$	0,445 m	-0,445 m	$\pm 0,5 \text{ m/s}$	$\pm 5 \text{ m/s}^2$
	$z_{Hex.}$	0,368 m	-0,387 m	$\pm 0,5 \text{ m/s}$	$\pm 6 \text{ m/s}^2$
	$\varphi_{Hex.}$	18 °	-18 °	$\pm 30,0 \text{ }^\circ/\text{s}$	$\pm 90 \text{ }^\circ/\text{s}^2$
	$\theta_{Hex.}$	18 °	-18 °	$\pm 30,0 \text{ }^\circ/\text{s}$	$\pm 90 \text{ }^\circ/\text{s}^2$
	$\psi_{Hex.}$	21 °	-21 °	$\pm 30,0 \text{ }^\circ/\text{s}$	$\pm 120 \text{ }^\circ/\text{s}^2$

2.2 Fahrzeugsimulation

Aufgrund der verschiedenen Anwendungsfelder für die Fahrdynamiksimulation stehen unterschiedliche Konzepte zur Verfügung. Dabei kann vor allem die Komplexität des Modells stark variieren. Stehen globale Eigenschaften eines Fahrzeuges im Fokus, wie bspw. die Reaktion auf Seitenwind, können mit einem einfachen Modellansatz, wie einem erweiterten Einspurmodell, bereits gute Ergebnisse erzielt werden [52]. Der Vorteil solcher Modelle liegt darin, dass auch zur Modellidentifikation weniger Parameter bekannt sein müssen als zur Auslegung eines komplexeren Modells. Ein solches kommt zum Einsatz, wenn Untersuchungen auf Bauteilebene durchgeführt werden. Hier werden zweispurige Mehrmassenmodelle aufgebaut, die eine detailgenaue Abbildung von Achsen, Antrieb und Lenkung bis hin zu vernetzten Systemen im Fahrzeug ermöglichen [53]. Die Parametrierung eines komplexen Fahrdynamikmodells erfordert einen erhöhten Systemidentifikationsaufwand. So ist es meist notwendig, Teilsysteme eines Fahrzeuges getrennt zu identifizieren und diese dann im Gesamtmodell zu integrieren.

Daraus wird deutlich, dass eine genaue Systemkenntnis des betrachteten Fahrzeuges notwendig ist. Die Verwendung von solch komplexen Modellen,

welche das gesamte Fahrzeugverhalten abbilden, begann daher bei den Fahrzeugherstellern selbst. Die meisten OEMs verfügen inzwischen über eigene Fahrdynamikmodelle. Da viele Fahrzeugkomponenten inzwischen auch komplett von Zulieferern entwickelt und gefertigt werden, steigt die Bedeutung der Fahrzeugsimulation ebenso für diese Unternehmen. Da die Eigenentwicklung eines solchen umfassenden Modells sehr aufwändig ist, hat sich mittlerweile ein Markt für Fahrdynamiksimulationssoftware (siehe bspw. [54,55]) gebildet. Letztlich entscheidet der Einsatzzweck, welches Modell mit welchem Komplexitätsgrad am Fahrsimulator eingesetzt wird.

2.2.1 Einsatz im Simulator

Modelle für die Fahrzeugsimulation werden für ein großes Spektrum an Entwicklungsaufgaben herangezogen. Dazu werden Modelle erstellt, die verschiedene Fahrzeugtypen widerspiegeln. Mit diesen ist es möglich, einzelne Komponenten des Fahrzeuges, Antriebsstränge unterschiedlicher Konfiguration sowie Fahrdynamik- oder Aerodynamikfragestellungen zu betrachten.

Solche Fahrzeugmodelle werden häufig in einer Simulationsumgebung betrieben, die es ermöglicht, das Fahrzeug definierte Manöver ausführen zu lassen. In diese Manöver können auch Umgebungsbedingungen, wie die Oberflächenbeschaffenheit der Straße, integriert werden. Dies ermöglicht eine Bewertung der Fahreigenschaften aufgrund der erhobenen Daten aus der Simulation.

Um auch Systeme zu testen, die in die Fahrzeugführung eingreifen, können solche Funktionen über Schnittstellen an die Modelle angebunden werden. Dabei kann auch Hardware zum Einsatz kommen, welche dann mit dem Simulationsmodell interagiert und somit als Hardware in the Loop in die Untersuchung integriert wird.

In einem Fahrsimulator bildet das Fahrzeugmodell die zentrale Schnittstelle zwischen Fahrer und Simulatorumgebung. Für den Einsatz in einer Untersuchung im Simulator werden, wie oben beschrieben, vorab Untersuchungen mit dem Fahrzeugmodell durchgeführt. Nach der entsprechenden Auslegung des Modells wird dieses in der Umgebung des Simulators integriert. Dadurch

wird ein durchgehender Prozess von der Fahrzeugsimulation zum interaktiven Test im Simulator gewährleistet.

2.2.2 Simulation in Echtzeit

Unabhängig vom Einsatzzweck ist die Simulation des Fahrzeugmodells in Echtzeit essenziell. Da der Mensch das Fahrzeugmodell steuert, muss dieser immer in definierten Zeitschritten über den Fahrzeugzustand Rückmeldung bekommen. Gelingt dies nicht, können Sprünge oder Verzögerungen auftreten, die als nicht realistisch wahrgenommen werden.

Die Anforderung der Echtzeitfähigkeit stellt vor allem für komplexe Modelle eine Herausforderung dar. Hier stellt sich die Frage nach der geeigneten Zielhardware und der Kompatibilität mit der genutzten Software. Dabei können für selbst entwickelte Modelle auch vergleichsweise günstige Echtzeitbetriebssysteme [56] oder Open-Source-Linuxlösungen zum Einsatz kommen. Diese sind meist bereits auf einem handelsüblichen PC lauffähig. Darüber hinaus ist Echtzeithardware, die spezifisch für Fahrdynamikmodelle [57] angeboten wird oder aus dem Rapid-Prototyping-Bereich [58] stammt, verfügbar. Bei dem Übergang von der Offline-Simulation zur Echtzeitvariante ist auf die Konsistenz der beiden Varianten zu achten (siehe Kapitel 2.2.1).

Die Software Matlab der Firma The MathWorks beinhaltet eine Echtzeitplattform in Form der Toolbox Simulink Realtime [59] bzw. ihrem Vorgänger xPC. Diese wird in der Version 5.1 für den hier beschriebenen Motion-Cueing-Algorithmus verwendet.

Neben der Fahrzeugsimulation gilt die Echtzeitanforderung für praktisch alle im Simulator vorhandenen Systeme. Dabei wird stets versucht, die Systemlaufzeit der Simulationsumgebung so gering wie möglich zu halten.

2.3 Bewegungswahrnehmung

Um Fahrzeugbewegungen durch ein Bewegungssystem mit begrenztem Arbeitsraum für den Menschen realitätsgetreu nachbilden zu können, ist die Kenntnis der grundlegenden Wahrnehmungsmechanismen des Menschen notwendig. Der Mensch nutzt zur Wahrnehmung von Veränderungen in der Umwelt und im Körperinnern verschiedene einzelne Sinneszellen oder komplexe Sinnesorgane [60].

Abbildung 2.2 zeigt die Wirkkette der menschlichen Informationsverarbeitung. Ein durch die Umwelt auf den Menschen einwirkender Reiz wird von einem oder mehreren Rezeptoren eines Sinnesorganes aufgenommen. Dieses leitet die Information an das Gehirn weiter. Das Gehirn verarbeitet die aufgenommene Information, vergleicht diese ggfs. mit Gelerntem und löst eine entsprechende Reaktion eines Körperteils oder eines anderen Organes aus.

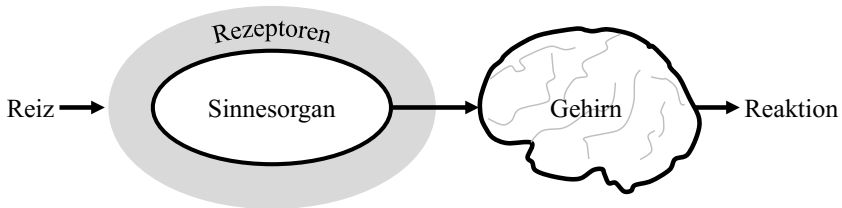


Abbildung 2.2: Wirkkette der menschlichen Informationsverarbeitung

Der Mensch verfügt zur Aufnahme von Reizen über eine Vielzahl von Sinnesorganen, welche zu sensorischen Systemen zusammengefasst werden [61]. In Abbildung 2.3 sind die für diese Arbeit relevanten Systeme mit zugeordneten Organen sowie deren Sensoren, Funktionen und Wirkungen dargestellt.

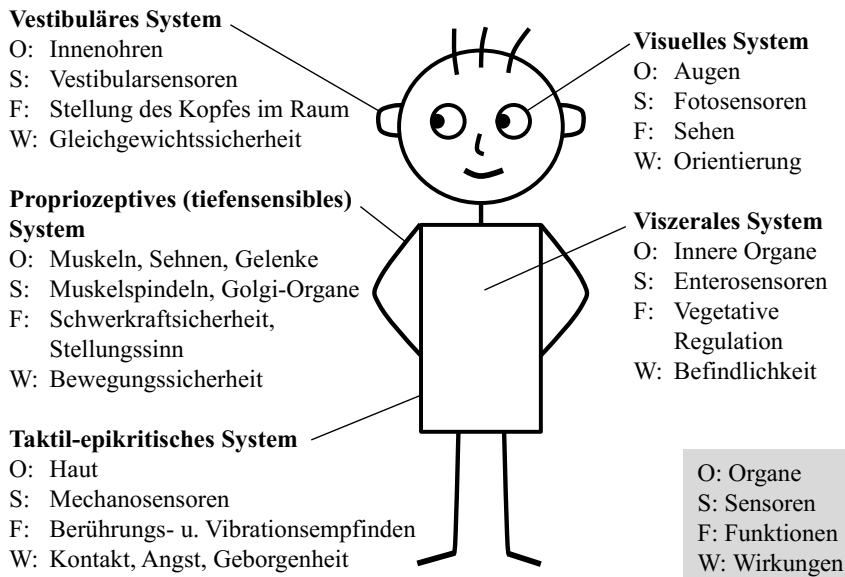


Abbildung 2.3: Sensorische Systeme zur Wahrnehmung und Verarbeitung [61]

Um eine Bewegung des Körpers feststellen zu können, werden die Signale der dargestellten Organe im Gehirn fusioniert. Erst durch die Gesamtheit der Signale kann eine Bewegung des Körpers festgestellt werden. Um in einem Simulator einen entsprechenden Eindruck zu erzeugen, müssen die wiedergegeben Reize daher konsistent sein. Ist dies nicht der Fall, kann ein falscher Bewegungseindruck entstehen oder Unwohlsein auftreten (vgl. Kapitel 2.3.2). Neben den Systemen zur Wahrnehmung der Körperstellung und der Eigenbewegung ist daher auch das viszerale System von Bedeutung. Überwiegt bei einem Probanden ein Gefühl von Angst oder Unwohlsein, kann sich dieser nicht mehr auf die gestellte Aufgabe konzentrieren und der Versuch erzeugt keine sinnvollen Ergebnisse.

Neben den aufgeführten Systemen werden auch Temperaturen, Geräusche, Gerüche und Geschmäcker wahrgenommen. Lediglich die Geräuschkulisse in einem Simulator hat Einfluss auf das Geschwindigkeitsempfinden. Dieses wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet.

Da das Gleichgewichtsorgan für die Wahrnehmung von Beschleunigungen in einem Fahrsimulator ausschlaggebend ist, wird dieses im Folgenden näher betrachtet. Für die Funktionsweise der übrigen sensorischen Systeme wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

2.3.1 Das Gleichgewichtsorgan

Das Gleichgewichtsorgan (Vestibularapparat) befindet sich im, in Abbildung 2.4 dargestellten, Innenohr und besteht aus den drei Bogengängen sowie dem Vorhof. Es dient zur Sensierung von Bewegungen sowie zum Bestimmen der Position des Körpers im Raum [60].

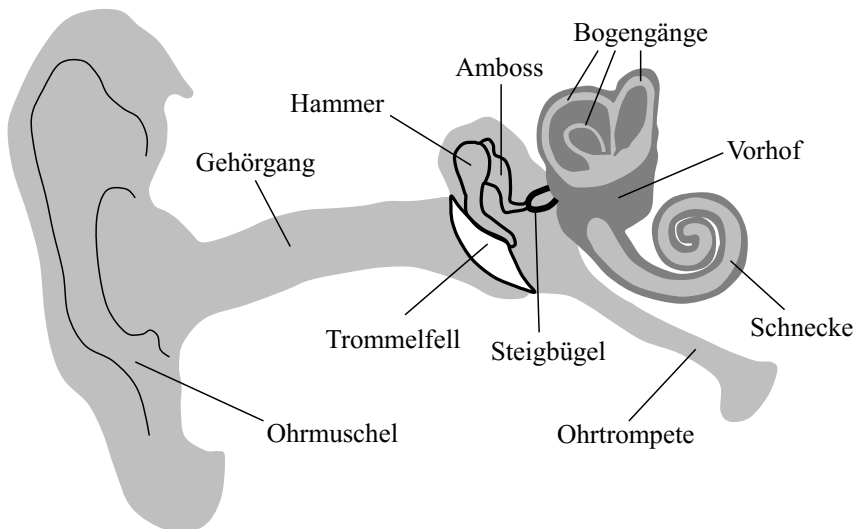


Abbildung 2.4: Übersicht über das Hör- und Gleichgewichtsorgan [60]

Zur Wahrnehmung linearer Bewegungen dienen zwei Maculaorgane, welche im Vorhof angeordnet sind. Dabei ist ein Maculaorgan horizontal angeordnet, während das Zweite vertikal positioniert ist. Haarzellen ragen in eine gallertartige Masse hinein, welche sich relativ zu dem Vorhof bewegen kann. Die dabei auftretenden Scherkräfte werden als Reize wahrgenommen [62].

Die Funktionsweise für den horizontalen und vertikalen Fall erläutert Abbildung 2.5.

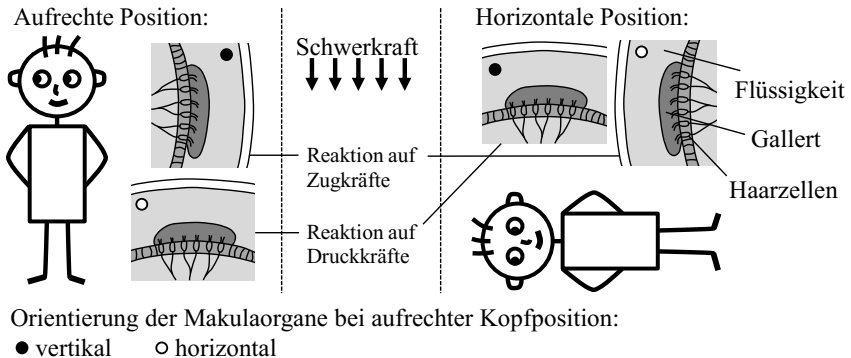


Abbildung 2.5: Sensierung von linearen Bewegungen [60]

Die drei Bogengänge des Innenohrs sind etwa im rechten Winkel zueinander angeordnet und stehen somit in Relation zu den drei Raumrichtungen. An jedem Ende der Bogengänge (Ampulle) befinden sich Haarsinneszellen, welche in die gallertartige Masse der Cupula hineinragen. Diese sind ähnlich wie die Maculaorgane aufgebaut, haben jedoch eine kuppelartige Form und die Haarzellen sind miteinander verbunden.

Findet eine Drehbewegung des Kopfes statt, kann die Gallertmasse aufgrund ihrer Trägheit der Bewegung nicht direkt folgen, was zu einem Abknicken der Sinneshäärchen führt (siehe Abbildung 2.6). Die Cupula beginnt, sich bei einer anhaltenden Bewegung mit zu drehen. Daher können nur rotatorische Beschleunigungen durch die Bogengänge wahrgenommen werden [60,62].

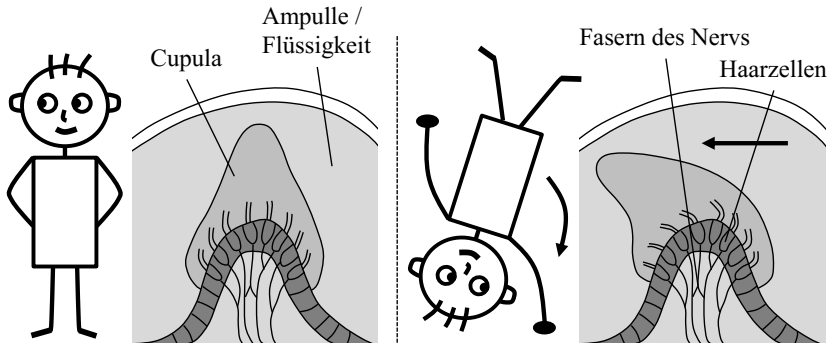


Abbildung 2.6: Sensierung von rotatorischen Bewegungen [60]

Befindet sich der Körper relativ zur Schwerkraft stationär nicht in der Senkrechten, kann dies nur durch die Maculaorgane und die Augen erfasst werden. Nimmt man dem Menschen die visuelle Information, wie dies in einer geschlossenen Kuppel eines Fahrsimulators geschieht, kann der Fahrer eine Lageänderung nicht von einer translatorischen Beschleunigung unterscheiden [63]. Dieser Effekt bildet die Grundlage für die in Kapitel 2.4.5 beschriebene Methode der Tilt Coordination.

2.3.2 Simulatorkrankheit

Als Simulatorkrankheit wird die Form der Kinetose⁴ bezeichnet, welche durch virtuelle Realitäten hervorgerufen werden kann. Die auftretenden Symptome entsprechen denen bei anderen Formen der Kinetose, wie der Reisekrankheiten. Diese können sich durch leichtes Unwohlsein über Schweißausbrüche bis hin zu Übelkeit mit Erbrechen ausdrücken [60,64].

Auslöser für das Auftreten der Simulatorkrankheit sind Reize, welche nach der Verarbeitung widersprüchliche Informationen liefern (Sensorkonflikt-Theorie [65]). Durch das Ausnutzen der im vorangegangenen Kapitel be-

⁴ Bewegungskrankheit, ausgelöst durch wiederholte Stimulation des Vestibularapparates [67].

schriebenen Effekte der Bewegungswahrnehmung in Simulatoren, entstehen solche Diskrepanzen meist zwischen der optischen und vestibulären Wahrnehmung. Daher wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Simulatorkrankheit höher, je weiter die Reize voneinander entfernt liegen. Simulatoren mit einer Bewegungsplattform haben hier einen Vorteil gegenüber statischen Systemen. Außerdem belegen Studien, dass durch Training der Versuchspersonen die Anfälligkeit für ein Erkranken reduziert werden kann [66], was sich mit den Erfahrungen aus der Seefahrt deckt [67].

2.3.3 Wahrnehmungsschwellen

Um einen Kompromiss zwischen der möglichst realitätsnahen Darstellung von Beschleunigungssignalen in einem begrenzten Bewegungsraum und den unerwünschten Auswirkungen wie dem Auftreten von Symptomen der Simulatorkrankheit zu finden, sind Wahrnehmungsschwellen von hoher Bedeutung. Die Existenz von Wahrnehmungsschwellen ist wissenschaftlich nachgewiesen, die absolute Größe dieser Schwellen unterliegt jedoch vielfältigen Einflüssen und wird bis heute in verschiedenen Studien untersucht und diskutiert.

Dabei stehen sowohl translatorische Beschleunigungen als auch rotatorische Geschwindigkeiten und Beschleunigungen im Fokus. Diese sind für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Methoden Washout und Tilt Coordination wichtig.

Einen guten Überblick über verschiedene Arbeiten und deren Ergebnisse gibt [63]. Zusammenfassend ergeben sich eine Existenz einer konstanten Schwelle bei Drehraten und eine frequenzabhängige Grenze bei Winkelbeschleunigungen. Für die Drehraten haben sich $3^\circ/\text{s}$ weitestgehend durchgesetzt [68]. Diese Schwelle wird auch für die in dieser Arbeit betrachteten Algorithmen verwendet.

Dennoch zeigen aktuelle Arbeiten, dass dieser Schwellwert durchaus höher liegen kann [69]. Diese unterschiedlichen Ergebnisse liegen an Einflussfaktoren wie Versuchen in Dunkelheit oder mit Visualisierung, Versuchsaufbauten und Frequenz der Testsignale, Messmethoden und der Erwartungshaltung

der Probanden [70]. Auch die mentale Belastung der Probanden kann diese Grenzwerte beeinflussen [69].

Gleiches gilt für lineare Beschleunigungen. Auch hier lassen sich keine einheitlichen Schwellenwerte festlegen und müssen ggfs. für den jeweiligen Simulator und das Szenario abgestimmt werden.

2.4 Grundlagen des Motion Cueing

2.4.1 Begriffserklärung „Motion Cue“

Mit Hilfe von sensorischen Stimuli ist der Mensch in der Lage, Bewegungen seines Körpers und der Umgebung wahrzunehmen (vgl. Kapitel 2.3). Für den Begriff Motion Cueing finden sich unterschiedliche Definitionen. In [71] werden sämtliche oben beschriebenen sensorischen Stimuli als Motion Cues bezeichnet. [63] fasst, ausgehend von diesen Definitionen, die „Wiedergabe realer Bewegungen durch akustische, visuelle, haptische, und vestibuläre Signale als Motion Cueing“ zusammen. In [72] findet sich im Kontext der Flugsimulation die allgemeine Beschreibung eines Motion Cues als Relativbewegung des Flugzeuges zum inertialen System, welche vom Piloten wahrgenommen wird.

Für die vorliegende Arbeit gilt die in [63] abgeleitete, ebenfalls häufig verwendete, Definition des Begriffs Motion Cue als Beschreibung für einen vestibulären Reiz. Dieser wird durch die Bewegungsplattform ausgelöst und kann vom Fahrer durch das Gleichgewichtsorgan sensiert werden. Der Begriff Cue fasst sämtliche auf eine Bewegung hinweisenden Reize zusammen.

2.4.2 Einteilung der Motion Cues

Motion Cues können in ihrer zeitlichen Abfolge im Allgemeinen in drei Kategorien aufgeteilt werden. Jede Kategorie repräsentiert bestimmte Bewegungsphasen, wie sie beim Führen eines Fahrzeuges auftreten [63]:

- Anfängliche Motion Cues (auch initial oder onset Motion Cues) geben die erste Phase einer Bewegung oder hochfrequente Bewegungen wieder. Diese treten bei Richtungsänderungen, Schaltvorgängen oder durch Fahrbahnunebenheiten auf.
- Verbindende Motion Cues (auch transient Motion Cues) beschreiben die Übergangsphase vom Bewegungsbeginn zu stationären Zuständen.
- Dauerhafte Motion Cues repräsentieren anhaltende Signale, wie sie bspw. bei einer stationären Kurvenfahrt auftreten.

Je nach Definition des Begriffes Motion Cueing finden sich weitere Kategorien, bzw. werden die hier genannten Kategorien weiter unterteilt. In [71] werden verbindende Motion Cues in hoch- und niederfrequente Anteile aufgeteilt und zusätzlich warnende Motion Cues eingeführt. Der Übergang zu haptischen Reizen ist hier fließend. [72] fasst warnende und onset Motion Cues als anfängliche Motion Cues zusammen. In dieser Arbeit werden die oben beschriebenen drei Kategorien verwendet, da sie die Struktur des Bewegungssystems des Stuttgarter Fahrsimulators widerspiegeln.

2.4.3 Fehlende und falsche Motion Cues

Das Auftreten von fehlenden oder fehlerhaften Motion Cues kann mehrere Ursachen haben. Einer der Gründe ist der beschränkte Bewegungsraum eines Simulators, der dadurch schlicht nicht in der Lage ist, sämtliche Fahrzeugbewegungen originalgetreu nachzubilden. Weiterhin kann auch die Dynamik des Systems an ihre Grenzen kommen oder fehlerhafte Signale durch den verwendeten Motion-Cueing-Algorithmus erzeugt werden. Die Fehler können in folgende Typen eingeteilt werden [63,72]:

- Fehlende Motion Cues beschreiben Stimuli, die nicht dargestellt werden.
- Falsche Motion Cues sind Reize, die vom Fahrer nicht erwartet werden, jedoch trotzdem auftreten, oder eine falsche Bewegungsinformation darstellen.

- Skalierungsfehler beschreiben einen spürbaren Unterschied zwischen dem erwarteten und dem wahrgenommenen Reiz.
- Phasenfehler entstehen durch zeitlich versetzte Reize.

Sämtliche beschriebenen Fehlertypen haben gemein, dass die vom Fahrer erwarteten und die simulierten Bewegungsreize nicht übereinstimmen. Allgemein gilt, je weniger falsche Motion Cues auftreten, desto besser ist der Fahreindruck in einem Simulator.

In den folgenden Kapiteln wird auf Methoden zur Vermeidung von fehlerhaften Motion Cues eingegangen sowie deren Auswirkung auf die Bewegungswahrnehmung des Fahrers erläutert.

2.4.4 Washout

Alle in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Simulatorbauformen haben einen eingeschränkten linearen Bewegungsraum gemein. Dem im Widerspruch stehen für praktisch alle beschriebenen Anwendungsfälle große, lineare Soll-Bewegungen. Diese sind gerade beim Fahrzeug signifikant, da hier lineare Beschleunigungen dominieren. Um diese Fahrzeugbewegungen im begrenzten Arbeitsraum abbilden zu können, ist das Prinzip des sogenannten „Washout“ weit verbreitet. Durch das „Auswaschen“ der auftretenden Beschleunigungssignale wird die Simulatorplattform nach einer anfänglichen Bewegung langsam wieder in eine Position gebracht, von der aus der größte Bewegungsraum zur Verfügung steht. In der Regel ist dies auch die mittlere Position des Bewegungssystems [63]. Bei speziellen Bauformen, wie z. B. einer Zentrifuge, kann dies jedoch auch eine Kreisbahn sein. Das Prinzip des Washout kommt für anfängliche und verbindende Motion Cues zum Einsatz. Zur Realisierung des Washout-Effektes sei auf Kapitel 2.5.2 verwiesen.

2.4.5 Tilt Coordination

Durch das oben beschriebene Auswaschen von Beschleunigungssignalen fallen niederfrequente Signalanteile weg. Um auch solche dauerhaften Motion

Cues darstellen zu können, wird das Verfahren der Tilt Coordination angewendet. Dabei nutzt man die in Kapitel 2.3.1 beschriebene Eigenschaft des menschlichen Gleichgewichtsorganes aus, nicht zwischen einer Neigung des Körpers und einer translatorischen Beschleunigung unterscheiden zu können. Somit ist es möglich, stationäre Beschleunigungen durch ein Kippen der Simulatorplattform darzustellen [63].

2.5 Regelungstechnische Grundlagen

Um Beschleunigungen mit einem Simulator nachzubilden, kommt ein dynamisches System, das Bewegungssystem, zum Einsatz. Daher werden sowohl für die Ermittlung der Systemdynamik als auch für die Ansteuerung des Systems regelungstechnische Methoden angewandt. Auf Grundlagen, die in dieser Arbeit verwendet werden, wird an dieser Stelle eingegangen.

2.5.1 Betrachtungen im Frequenzbereich

Für die mathematische Beschreibung linearer technischer Prozesse gibt es nach [73] zwei grundlegende Modellstrukturen:

Bei parametrischen Modellen wird aufgrund physikalischer Zusammenhänge eine Modellstruktur angenommen und entsprechend parametrisiert. Diese Methode kommt z. B. bei Feder-Dämpferelementen zum Einsatz, da sich hier das dynamische Verhalten mit einer Differentialgleichung beschreiben lässt und deren Parameter bekannt sind oder bestimmt werden können. Parametrische Modelle werden daher zur Beschreibung von Systemen herangezogen, deren Subsysteme oder Parameter in der Simulation variiert werden sollen. Ein komplexes Fahrdynamikmodell wird als parametrisches Modell aufgebaut, um einzelne Fahrzeugkomponenten, wie bspw. Federelemente, variieren zu können und Rückschlüsse auf das Gesamtverhalten des realen Fahrzeuges zu ermöglichen.

Bei nichtparametrischen Modellen steht das Ein-/Ausgangsverhalten des Gesamtsystems im Fokus. Einzelne Teilsysteme, sowie deren Wirkung aufeinander, werden nicht explizit modelliert. Für das Bewegungssystem eines Fahrmodulators gilt diese Annahme. Hier ist die Nachbildung einer gewünschten Bewegung gefordert. Das Soll- und Ist-Signal sollen möglichst exakt übereinstimmen. Die Wirkungen einzelner Antriebe aufeinander oder auf das Gesamtverhalten sind, im Gegensatz zum Fahrzeugmodell, nicht von zentraler Bedeutung. Für die Identifikation des Übertragungsverhaltens bietet sich die Frequenzgangmessung mit periodischen Testsignalen unterschiedlicher Frequenzen an.

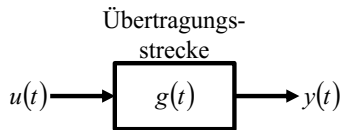


Abbildung 2.7: Blockschaltbild eines linearen Übertragungsgliedes

Für das in Abbildung 2.7 dargestellte einfache lineare Übertragungsglied ergibt sich nach [74] das Ausgangssignal als Faltung des Eingangssignales sowie der Übertragungsstrecke zu:

$$y(t) = g(t) * u(t) \quad \text{Gl. 2.1}$$

Mithilfe der Laplace-Transformation [75] kann aus Gl. 2.1 die Übertragungsfunktion im Bildbereich als Funktion der transformierten Ein- und Ausgangssignale ermittelt werden:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Der Frequenzgang beschreibt das Verhalten des dynamischen Systems. Mit dem Amplitudenverhältnis kann ein frequenzabhängiger Verstärkungsfaktor

zwischen je einem Ein- und Ausgangssignal des Systems gebildet werden. Der Phasengang eines solchen Signalpaares gibt das zeitliche Verhältnis zwischen Ein- und Ausgang an [74].

Mithilfe dieser Kriterien können die Güte von Bewegungssystemen und Motion-Cueing-Algorithmen bestimmt werden. Ziel ist eine möglichst geringe Verfälschung des Signales, also keine Veränderung der Amplitude, und eine möglichst geringe zeitliche Verschiebung.

Um diese Methode anwenden zu können, muss sichergestellt werden, dass das System innerhalb seines linearen Übertragungsverhaltens betrieben wird. Dies wird in dieser Arbeit vorausgesetzt, da ein Betreiben des Bewegungssystems außerhalb seiner technischen Grenzen einen fehlerhaften Zustand bedeutet. Die Analyse im Bildbereich bietet gegenüber einer Betrachtung im Zeitbereich den Vorteil, gleich die gesamte Bandbreite des Systems betrachten zu können und nicht nur einzelne Frequenzen.

2.5.2 Filter

Für die in Kapitel 2.4.2 beschriebene Aufteilung fahrdynamischer Eingangssignale in verschiedene Motion Cues spielen Filter eine wichtige Rolle. In klassischen Motion-Cueing-Algorithmen werden Hoch- und Tiefpassfilter verschiedener Ordnung eingesetzt, um mit deren unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich stationärer Anregungen sowohl den Washout-Effekt als auch die Tilt Coordination umsetzen zu können.

Durch lange Kurvenfahrten oder anhaltendes Beschleunigen oder Verzögern eines Fahrzeuges können stationäre Beschleunigungen in Fahrzeuglängs- und -querrichtung auftreten. Für eine beliebige Richtung gilt in diesem Fall:

$$a_{Frzg.} = const. \quad \text{Gl. 2.3}$$

Nach zweimaliger Integration mit $v_{Frzg.}(0) = v_{Frzg.,0}$ und $d_{Frzg.}(0) = d_{Frzg.,0}$ ergibt sich im Bildbereich für die Position:

$$D_{Frzg.}(s) = \frac{1}{s^3} a_{Frzg.} \quad \text{Gl. 2.4}$$

Nach der Anwendung des Endwertsatzes [76]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s F(s) \quad \text{Gl. 2.5}$$

auf Gl. 2.4 erhält man

$$\lim_{t \rightarrow \infty} d_{Frzg.}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s^3} a_{Frzg.} = \infty \quad \text{Gl. 2.6}$$

Aus Gleichung Gl. 2.6 folgt direkt, dass für die Umsetzung des Washout-Effektes für ein stationäres Beschleunigungssignal ein Hochpassfilter mindestens dritter Ordnung notwendig ist. Daher wird an dieser Stelle auf die grundlegenden Eigenschaften von Filtern bis zu einer Ordnung von drei kurz eingegangen.

Ein Filter wird durch den Verstärkungsfaktor k und die Grenzfrequenz ω_0 , welche den Frequenzbereich in Durchlass- und Sperrbereich unterteilt, beschrieben. Im Durchlassbereich soll das Eingangssignal möglichst unverändert übertragen werden, während im Sperrbereich eine Dämpfung stattfindet [77]. Für ein Filter zweiter Ordnung stellt das Dämpfungsmaß D ein zusätzliches Charakteristikum dar. Dieses hat Einfluss auf die Stabilität des Filters sowie auf dessen zeitliches Verhalten. Ein Filter dritter Ordnung wird üblicherweise aus je einem Filter erster und zweiter Ordnung konstruiert. Für Hochpassfilter gelten die Gleichungen:

$$\text{1. Ordnung:} \quad G_{HP1}(s) = k \frac{s}{T_1 s + 1} \quad \text{Gl. 2.7}$$

2. Ordnung:
$$G_{HP2}(s) = k \frac{s^2}{T_2^2 s^2 + 2DT_2 s + 1} \quad \text{Gl. 2.8}$$

3. Ordnung:
$$G_{HP3}(s) = k \frac{s^3}{(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2DT_2 s + 1)} \quad \text{Gl. 2.9}$$

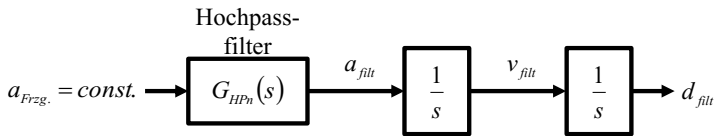


Abbildung 2.8: Hochpassfilter mit zweimaliger Integration

Je nach Ordnung des Filters ergibt sich ein anderes Konvergenzverhalten. Für einen, wie in Abbildung 2.8 gezeigten, Signalverlauf mit einer konstanten Anregung sind die Konvergenzverhalten in Tabelle 2.2 eingetragen.

Tabelle 2.2: Konvergenzverhalten von Hochpassfiltern bis zur dritten Ordnung

Filterordnung	a_{filt}	v_{filt}	d_{filt}
$n = 1$	0	$const.$	∞
$n = 2$	0	0	$const.$
$n = 3$	0	0	0

Für Tiefpassfilter gilt analog:

1. Ordnung:
$$G_{TP1}(s) = k \frac{1}{T_1 s + 1} \quad \text{Gl. 2.10}$$

2. Ordnung:
$$G_{TP2}(s) = k \frac{1}{T_2^2 s^2 + 2DT_2 s + 1} \quad \text{Gl. 2.11}$$

$$3. \text{ Ordnung: } G_{TP3}(s) = k \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2DT_2 s + 1)} \quad \text{Gl. 2.12}$$

Das Konvergenzverhalten der Tiefpassfilter ist trivial, da diese für $t \rightarrow \infty$ das konstante Eingangssignal unverändert weiterleiten.

2.6 Koordinatensysteme

Für in der Fahrzeugtechnik eingesetzte Koordinatensysteme gibt es zwei normierte Vorgaben. Die DIN ISO 8855 [78] (Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe) stellt eine modifizierte Variante der internationalen Norm ISO 8855 dar. Neben den Vorgaben für Koordinatensysteme sind darin weitere Begriffe zur Beschreibung von Fahrzeuggrößen festgehalten [79].

Einen international ebenfalls gängigen Standard beschreibt die SAE J670 [80]. Diese unterscheidet sich teilweise von der ISO 8855, z. B. bei der Ausrichtung von Koordinatensystemen. In dieser Arbeit finden die Vorgaben aus der DIN ISO 8855 Anwendung.

In Abbildung 2.9 sind die in dieser Arbeit verwendeten Koordinatensysteme bezogen auf das Fahrzeug nach DIN ISO 8855 dargestellt. Die Bewegungen der gefederten Fahrzeugmasse werden am Fahrzeugreferenzpunkt angegeben. Dieser kann beliebig gewählt werden. In der Fahrdynamiksimulation wird häufig der Fahrzeugschwerpunkt verwendet. Die $x_{Frzg.}$ -Achse des fahrzeugfesten Koordinatensystems zeigt parallel zur Fahrzeuglängsachse in Fahrtrichtung. Die weiteren Achsen sind als rechtwinkliges Rechtssystem angeordnet. $y_{Frzg.}$ zeigt demnach in Fahrtrichtung nach links und $z_{Frzg.}$ vertikal nach oben.

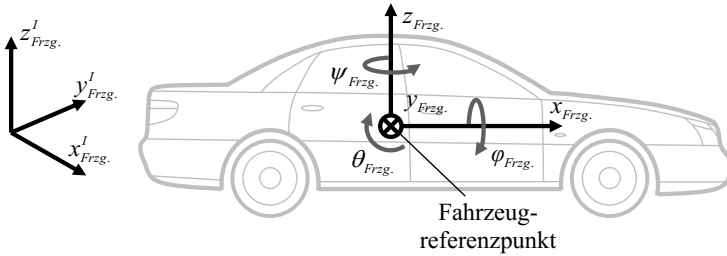


Abbildung 2.9: Koordinatensysteme im Fahrzeug

Durch Drehung des fahrzeugfesten Koordinatensystems bezogen auf das ortsfeste Koordinatensystem $(x_{Frzg.}^I, y_{Frzg.}^I, z_{Frzg.}^I)$ werden die rotatorischen Aufbaubewegungen des Fahrzeuges beschrieben. Dabei wird zunächst um die vertikale $z_{Frzg.}^I$ -Achse (Gierbewegung, $\psi_{Frzg.}$), dann um die resultierende $y_{Frzg.}$ -Achse (Nickbewegung, $\theta_{Frzg.}$) und schließlich um die resultierende $x_{Frzg.}$ -Achse (Rollbewegung, $\phi_{Frzg.}$) gedreht.

Für die Bestimmung der Positionen des Schlittensystems, des Hexapods sowie des Fahrers im Inneren des Fahrzeuges in der Kuppel werden mehrere Koordinatensysteme verwendet. Der Referenzpunkt der beiden Schlittensysteme befindet sich, wie in Abbildung 2.10 gezeigt, mittig auf dem dreieckförmigen Y-Schlitten. In longitudinaler und lateraler Richtung werden die Positionen des Schlittensystems relativ zur Mitte des linearen Bewegungsraumes mit x_{XY} und y_{XY} angegeben. Da dieses Teilsystem keine rotatorischen Bewegungen erzeugen kann, wird auf eine Darstellung dieser verzichtet.

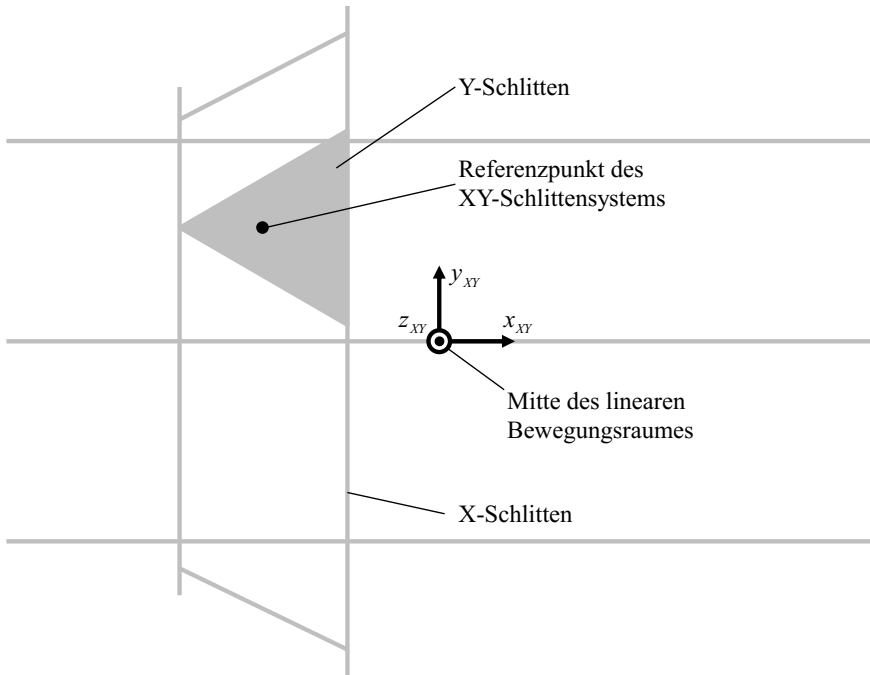


Abbildung 2.10: Koordinatensystem des Schlittensystems

Das Schlittensystem kann keine vertikalen Bewegungen ausführen. Für die Wahl der vertikalen Komponente des Koordinatensystems wird daher auf den Referenzpunkt der gesamten Anlage eingegangen. Dieser befindet sich in der Mitte des gesamten Bewegungsraumes. Für die longitudinale und laterale Richtung entspricht dies der Mitte des linearen Bewegungsraumes (siehe Abbildung 2.10), in vertikaler Richtung der Position auf Höhe der Anschlagpunkte der Aktoren an den Kuppelboden bei halb ausgefahrenen Aktoren. Somit steht an dieser Position der maximale Bewegungsraum in alle Richtungen zur Verfügung. Für z_{XY} wird dieser Punkt als Ursprung gewählt wodurch $z_{XY} = 0$ gilt.

Die Bewegungen des Hexapods werden, wie in Abbildung 2.11 gezeigt, am Simulatorreferenzpunkt mit den Koordinaten $x_{Hex.}$, $y_{Hex.}$ und $z_{Hex.}$ angegeben. In der Ausgangsposition des Simulators entsprechen sich der Ursprung

dieses Koordinatensystems und die Mitte des gesamten Bewegungsraumes. Führt das Schlittensystem eine Bewegung aus, wird das Koordinatensystem mitbewegt und befindet sich somit über dem Referenzpunkt des XY-Schlittensystems. Die Position des Simulatorreferenzpunktes bezogen zur Mitte des gesamten Bewegungsraumes ist die Summe aus den beiden eingeführten Positionen und wird in $x_{Sim.}$, $y_{Sim.}$, $z_{Sim.}$ angegeben.

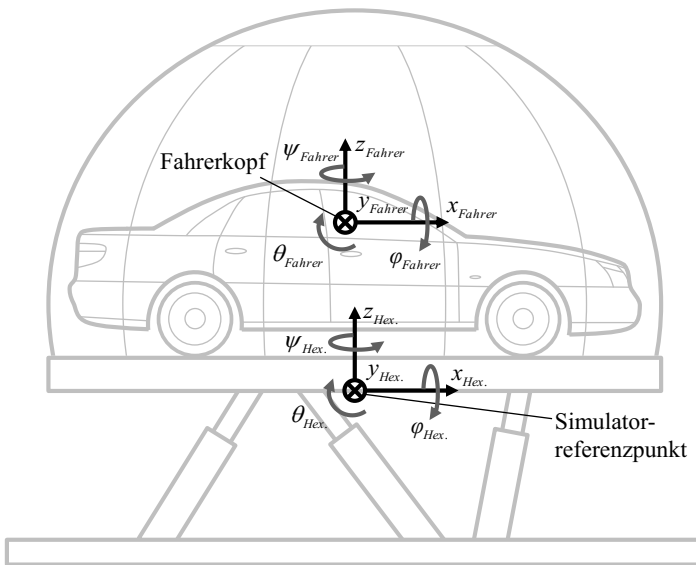


Abbildung 2.11: Koordinatensystem des Hexapods

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, nimmt der Mensch Beschleunigungen durch das Innenohr wahr. Eine Betrachtung der am Fahrerkopf auftretenden Beschleunigungen in Fahrzeug und Simulator liegt daher nahe. Hierfür wird ein mitbewegtes Koordinatensystem am Fahrerkopf (x_{Fahrer} , y_{Fahrer} , z_{Fahrer}) eingeführt. Der Bezug auf den Fahrerkopf bietet jedoch noch weitere Vorteile.

Durch Verwenden der Tilt Coordination entstehen zusätzlich zu den rotatorischen Bewegungen des Fahrzeuges weitere Drehbewegungen. Haben

diese Bewegungen ihren Drehpunkt an der Position des Fahrerkopfes, treten keine Querbeschleunigungsanteile auf.

Häufig wird ein Fahrzeug simuliert, welches nicht als Mockup zur Verfügung steht. Dadurch entstehen unterschiedliche geometrische Verhältnisse. Verwendet man in der Fahrzeugsimulation den Fahrerkopf als Fahrzeugreferenzpunkt, ergibt sich eine vom verwendeten Mockup unabhängige Beschreibung.

Für die Berechnung von Größen an der Position des Fahrerkopfes in der Fahrzeugsimulation sowie für deren Wiedergabe im Simulator ist jeweils eine Koordinatentransformation notwendig. Eine Beschreibung der Transformation rechtwinkliger Koordinaten findet sich bspw. in [81].

2.7 Klassische Motion-Cueing-Algorithmen

Wie der Fahrsimulator selbst, haben auch die Algorithmen zur Ansteuerung der Bewegungsplattform ihren Ursprung in der Flugsimulation. Für eine Bewegungsplattform mit translatorischen und rotatorischen Freiheitsgraden ist der Classical-Washout-Algorithmus einer der am weitesten verbreiteten Ansätze. Beschreibungen dieses Algorithmus existieren bereits aus den 1970er-Jahren [82]. Für die Ansteuerung der Bewegungsplattform nutzt der Algorithmus die beschriebenen Methoden des Washout-Effektes, der Tilt Coordination, sowie der zeitlichen Einteilung verschiedener Motion Cues.

2.7.1 Der Classical-Washout-Algorithmus

Um das Verhalten eines Flugzeuges mit einer Bewegungsplattform zu simulieren, werden meist dessen translatorische und rotatorische Bewegungen in verallgemeinerten Koordinaten beschrieben [83]. Hier werden die resultierenden verallgemeinerten Kräfte nach den Lagrangeschen Gleichungen zweiter Art sowie die Winkelgeschwindigkeiten des Flugzeuges als Eingänge für den Motion-Cueing-Algorithmus verwendet [84,85].

Für die Beschreibung der Bewegungen eines Kraftfahrzeuges ist eine Darstellung in kartesischen Koordinaten in Anlehnung an die DIN ISO 8855 anschaulicher. Dieser Ansatz wird in der Literatur häufig in Verbindung mit der Fahrzeugsimulation eingesetzt (vgl. z. B. [86]) und auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Das Prinzip des Classical-Washout-Algorithmus eignet sich für Bewegungssysteme mit unterschiedlicher Anzahl an Freiheitsgraden. Der Algorithmus wurde und wird bereits an diversen Bewegungssystemen eingesetzt und entsprechend verändert oder erweitert. Da in dieser Arbeit der Stuttgarter Fahr-simulator verwendet wird, wird der Algorithmus für ein System mit acht Freiheitsgraden beschrieben.

Für longitudinale Beschleunigungen zeigt Abbildung 2.12 die Struktur des Classical-Washout-Algorithmus. Für laterale Bewegungen entspricht die Struktur der gezeigten Form. Die vom Fahrzeugmodell berechnete Beschleunigung wird in drei Frequenzbänder aufgeteilt.

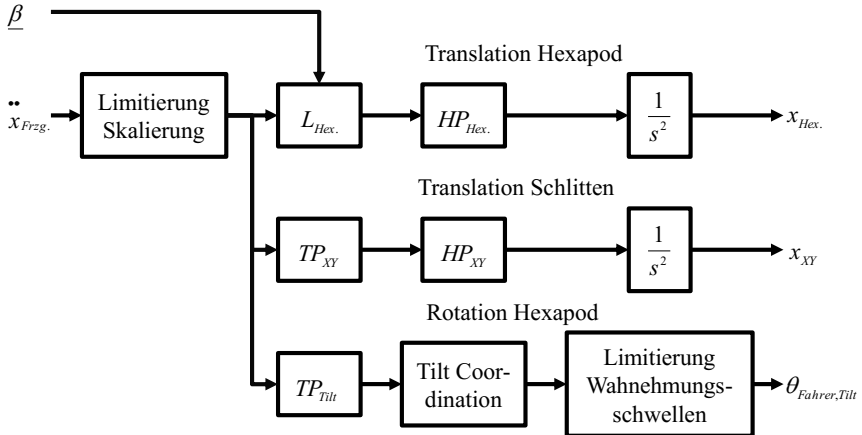


Abbildung 2.12: Struktur des Classical-Washout-Algorithmus

Der Hexapod verfügt gegenüber dem Schlittensystem über eine bessere Dynamik, da dieser eine geringere Masse bewegen muss. Anfängliche Motion Cues werden daher durch eine translatorische Bewegung des Hexapods aus-

geführt. Das Hochpassfilter HP_{Hex} sollte, wie in Kapitel 2.5.2 erläutert, über mindestens drei Ordnungen verfügen, um ein Zurückkehren der Plattform in die Ausgangsposition zu gewährleisten. Durch die Transformation L_{Hex} wird die momentane Orientierung der Plattform beachtet.

Über die Tilt Coordination im unteren Pfad werden anhaltende Motion Cues umgesetzt. Die Limitierung der Drehbewegung, mithilfe der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Wahrnehmungsschwellen, reduziert das Auftreten von Motion Sickness. Der Anteil der durch die Tilt Coordination wiedergegebenen Beschleunigungen wird über den Tiefpassfilter TP_{Tilt} eingestellt. Um einen realistischen Fahreindruck zu erhalten, sollte dieser Anteil möglichst gering gehalten und stattdessen das Schlittensystem eingesetzt werden.

Dieses wird über den aus TP_{XY} und HP_{XY} resultierenden Bandpassfilter angesteuert und realisiert verbindende Motion Cues. Für HP_{XY} gelten die gleichen Voraussetzungen bezüglich des Washout-Effektes wie für das Hochpassfilter im Pfad der translatorischen Hexapodbewegung.

Ändert sich die Orientierung der Plattform durch eine Drehung, kann dies für lineare Bewegungen mit dem Hexapod ausgeglichen werden. Bei gleichzeitiger lateraler Bewegung bei einem eingestellten Gierwinkel erfolgt die laterale Bewegung dann weiterhin parallel zur y_{Fahrer} -Achse. Ein entsprechender Ausgleich ist mit dem Schlittensystem nur bei gleichzeitiger Verschiebung in longitudinaler und lateraler Richtung möglich, was einen großen longitudinalen Bewegungsraum voraussetzt. Für Roll- und Nickbewegungen ist die Korrektur mechanisch ausgeschlossen. In der Praxis wird für alle Winkel auf eine Korrektur der Orientierung verzichtet. Nach [63] können die auftretenden falschen Motion Cues vernachlässigt werden.

Für vertikale Anregungen kann lediglich der Hexapod verwendet werden. Dazu wird dieser, analog des translatorischen Pfades in Abbildung 2.12, angeregt. Für Gierbewegungen gilt dies ebenfalls. Um dem Fahrer einen Eindruck des Richtungswechsels zu vermitteln, werden hierzu anfängliche Motion Cues durch Verwendung der Gierbeschleunigung realisiert.

Für die Bewertung eines Fahrzeuges sind dessen Roll- und Nickbewegungen wichtig. Diese Bewegungen treten auch bei der realen Fahrt auf und werden

visuell wiedergegeben. Auf Wahrnehmungsschwellen kann daher verzichtet werden. Die Größenordnung der Winkel befindet sich außerdem innerhalb der statischen Grenzen des Bewegungssystems, wodurch die Winkel direkt oder mit einer auf die anderen Kanäle abgestimmten Skalierung wiedergegeben werden können. Diese Winkel werden über eine Addition mit den von der Tilt Coordination geforderten Winkeln durch die Bewegungsplattform gestellt.

Der Classical-Washout-Algorithmus hat eine weite Verbreitung gefunden, da er mit nahezu jedem Bewegungssystem eingesetzt werden kann. Die Parametrierung erfolgt abhängig von den Gegebenheiten des Bewegungssystems und der erwarteten Beschleunigungen innerhalb eines Szenarios. Der Einfluss der Parameter kann relativ einfach abgeschätzt werden, da diese einem bestimmten Freiheitsgrad zugeordnet sind. Kombinierte Einflüsse sind nicht vorhanden. Für die Wahl der Parameter sind in der Literatur bereits verschiedene Empfehlungen bzw. Herangehensweisen vorhanden (vgl. [72,87]).

Ein weiterer Vorteil ist, dass der Algorithmus, neben den angesprochenen Fahrzeugbeschleunigungen und Winkelinformationen, keine weiteren Daten benötigt. Dadurch ist der Algorithmus sehr robust gegenüber Umgebungseinflüssen und kann für praktisch alle Szenarien eingesetzt werden.

Diese Universalität ist gleichzeitig der größte Nachteil des Algorithmus. Häufig bleibt Bewegungsraum ungenutzt und Effekte bei der menschlichen Wahrnehmung werden nicht ausgenutzt. Spezifische Fahrdynamikszenarios kann er meist nicht ausreichend exakt nachbilden, um Bewertungen über das Fahrverhalten vornehmen zu können. Daher haben sich weitere Algorithmen und Ableitungen aus dem Classical-Washout-Ansatz entwickelt. Den meisten ist jedoch die Struktur dieses Ansatzes gemein.

2.7.2 Weitere klassische Algorithmen

Neben dem Classical-Washout-Algorithmus gibt es noch zwei weitere etablierte Ansätze: den Optimal-Control- sowie den Coordinated-Adaptive-Algorithmus. Beide Algorithmen finden Anwendung auf verschiedenen

Flug- sowie Fahrzeugsimulatoren. Sie ähneln strukturell dem Classical-Washout-Algorithmus.

Der Optimal-Control-Algorithmus nutzt Gewichtungsfunktionen statt Filtern, im Gegensatz zum Classical-Washout-Algorithmus. Darüber hinaus gibt es eine Kopplung zwischen den Fahrzeugwinkeln und der translatorischen Plattformposition. Die Gewichtungsfunktionen sind entweder Übertragungsglieder von höherer Ordnung oder Verstärkungsfaktoren, welche aus der Optimierung eines Kostenfunktional resultieren [88].

Für die Auslegung des Algorithmus wird ein Modell des menschlichen Vestibularapparates verwendet [83]. Dieses dient dazu, den Unterschied zwischen der vom Fahrer während einer realen Fahrt wahrgenommen Beschleunigung und der im Simulator wahrgenommenen Signale zu berechnen. Mit Hilfe eines Optimierungsprozesses wird der Fehler zwischen diesen Wahrnehmungen minimiert. Die aus dieser a priori Berechnung bestimmten Übertragungsfunktionen werden dann in einem Echtzeitsystem zur Ansteuerung des Simulators implementiert [89].

Der Coordinated-Adaptive-Algorithmus führt während der Laufzeit Anpassungen an den Filterparametern durch [90]. Ähnlich zum Optimal-Control-Ansatz wird ein Kostenfunktional minimiert. Der Algorithmus kann dadurch auf die aktuelle Plattformposition und Geschwindigkeit reagieren. Weiterentwicklungen des Algorithmus enthalten weitere Kriterien, wie z. B. die Zustände einzelner Aktuatoren [91].

Die drei beschriebenen Algorithmen wurden in diversen Studien miteinander verglichen. In der Regel wird allen Ansätzen eine gute Leistungsfähigkeit zugesprochen. Der Coordinated-Adaptive-Algorithmus kann dabei häufig die besten Ergebnisse erzielen [92]. Da dieser Algorithmus den komplexesten Ansatz darstellt und ständig Informationen über den Zustand des Simulators verarbeitet, liegt dieses Ergebnis nahe. Dagegen ist der Classical-Washout-Algorithmus am einfachsten in der Handhabung und der Implementierung an einem System.

2.7.3 Weiterführende Ansätze

Neben den drei oben beschriebenen Algorithmen zur Ansteuerung einer Bewegungsplattform, wurden weitere, weniger verbreitete Ansätze entwickelt. Diese stellen meist Erweiterungen der Algorithmen dar oder greifen deren Arbeitsprinzip und Struktur auf. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über einige Ansätze.

Für die Wahl der Filterparameter gibt es, wie oben angesprochen, verschiedene Empfehlungen. Um möglichst alle Beschleunigungsanteile eines Fahrzeuges mit dem Simulator abzubilden, wird in [63] mit komplementären Filtern und ohne Beschränkungen der Tilt Coordination gearbeitet. Es wird von einer besseren Wiedergabe der Sollbeschleunigungen berichtet. Dabei wird der Fahrer jedoch deutlich schnelleren Rotationen ausgesetzt, die evtl. vermehrt zu Unwohlsein führen können.

Lineare Filter haben einige für die Fahrsimulation negative Effekte. Bei Hochpassfiltern kann bei schnellem Abklingen eines Eingangssignales ein Beschleunigungssignal mit umgekehrtem Vorzeichen an die Bewegungsplattform weitergeleitet werden. Dies ist u. a. im Moment des Anhaltens eines Fahrzeuges der Fall. Der Fahrer spürt dann einen Ruck in Fahrtrichtung. Zur Vermeidung dieses Effektes werden Filter mit Anteilen kombiniert, die bei einem Anhaltevorgang das Soll-Signal geschwindigkeitsabhängig skalieren (vgl. Kapitel 6.2). Um auch bei einem Lastwechsel bei höheren Geschwindigkeiten diesen Effekt zu verhindern, gibt es Ansätze mit nichtlinearen Filtern [93], die gute Ergebnisse erzielen.

Mit der Entwicklung von neuartigen Bewegungssystemen wird es notwendig, deren Kinematik in dem Motion-Cueing-Algorithmus zu beachten, um die Leistungsfähigkeit des Systems auszunutzen. Für den Desdemonasimulator (vgl. Kapitel 2.1.2) wurde bspw. der Spherical-Washout-Algorithmus entwickelt [94], um dessen Bauform gerecht zu werden.

Die modellprädiktive Regelung findet aktuell zunehmend Anwendung. Diese eignet sich besonders für hochdynamische, kleinere Simulatoren [43]. Durch die Beachtung des Arbeitsraumes im Modell kann dieser besser ausgenutzt werden.

Vorausschauender Motion-Cueing-Algorithmus für den
Stuttgarter Fahrsimulator

Pitz, J.

2017, XXIII, 155 S. 57 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-17032-5