

Institut für Maschinen und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
der
Technischen Universität München

Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahr simulatoren für die Fahrzeugentwicklung

Hans Jürgen Negele

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

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Wachtmeister
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Bubb

Die Dissertation wurde am 19.06.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27.09.2007 angenommen.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München unter dem Ordinariat von Prof. Dr.-Ing. B. Heißing.

Die Dissertation ist das Ergebnis einer von großem Vertrauen zu meinem Ordinarius geprägten, fünf Jahre dauernden Arbeit am Lehrstuhl, welche den Rahmen für meine Lehr- und Forschungstätigkeit bildete. Es war mir eine große Freude, unter seiner Führung am Aufbau des Lehrstuhls mitwirken zu können.

Der Lehrstuhl bildete den Rahmen, meine Eltern aber schufen die Basis meines Werdeganges. Durch Ihr Vorbild haben sie meine Denk- und Arbeitsweise in einer Art geprägt, die als vorläufigen Höhepunkt zu dieser Arbeit geführt hat. Auch meinem Bruder Herbert und seiner Familie will ich danken für die große Akzeptanz meiner Arbeit, welche mir Selbstvertrauen und Rückhalt gab.

Herrn Professor Bubb möchte ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Professor Wachtmeister für die Leitung der Prüfungskommission danken.

Herr Dr. Fink hat meine Arbeit auf vielfältige Weise unterstützt. Jederzeit konnte ich sein von großer Erfahrung geprägtes, sicheres Urteil über den erreichten Stand der Arbeit einholen. Dieses Urteil trug durch das sachliche Aufzeigen von Schwachstellen und die klare Aussprache von Empfehlungen zum weiteren Vorgehen erheblich zur Qualität meiner Tagesarbeit und meiner Promotion bei. Beim ihm möchte ich mich deswegen besonders herzlich bedanken.

Vor allem während der Gründerzeit des Lehrstuhls herrschte eine sehr gutes und kollegiales Arbeitsklima am Lehrstuhl, das durch meine Kollegen und nicht zuletzt meine Sekretärin und Freundin Gaby Weigand möglich wurde.

Eine besondere Stellung unter meinen Kollegen nahm für mich Frank Diermeyer ein, der mich in vielen Gesprächen durch seine Hilfsbereitschaft und schnelle Auffassung persönlich und fachlich in dieser Zeit gefördert und gefordert hat.

Ebenso waren mir während meiner Zeit am Lehrstuhl Dr. Matthias Greger und Dr. Ralph Mayer wertvolle Kollegen. Mit Frau Dr. Carmen Theimert hatte ich das Vergnügen, Die Fahrsimulation am FTM aufzubauen, welcher uns und unseren Nachfolgern eine interessante und sowohl für die Industrie als auch für die anwendungsnahe Forschung nützliche Tätigkeit ermöglichte.

Denklingen im Januar 2008

Hans Jürgen Negele

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung – Problemstellung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen – Fahrzeugführung und menschliche Wahrnehmung.....	4
2.1	<i>Fahrzeugführung.....</i>	4
2.1.1	Aspekte der Fahraufgabe.....	6
2.1.2	Reiz-Reaktionsmechanismen bei der Fahrzeugführung.....	8
2.2	<i>Menschliche Wahrnehmung.....</i>	9
2.2.1	Gesichtssinn.....	10
2.2.2	Gehörsinn	13
2.2.3	Gleichgewichtssinn	14
2.2.4	Hautsinne.....	15
3	Stand der Technik – Anwendung und Technologie der Fahrsimulation	17
3.1	<i>Anwendung der Fahrsimulation.....</i>	19
3.1.1	Fähigkeitserwerb	20
3.1.2	Fahrerverhalten.....	21
3.1.3	Umwelt- und Verkehrstechnik	21
3.1.4	Fahrzeugtechnik	21
3.2	<i>Technik der Fahrsimulation.....</i>	22
3.2.1	Sichtsimulation.....	22
3.2.2	Bewegungssimulation	38
3.2.3	Geräuschsimulation	50
3.2.4	Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle.....	52
3.2.5	Datenbasis und Verkehrssimulation.....	56
3.2.6	Integrale Qualität der Simulation	60
4	Prüfstandsbeschreibung – FTM-Simulator	61
4.1	<i>Sichtsimulation.....</i>	63
4.2	<i>Bewegungssimulation.....</i>	66
4.3	<i>Geräuschsimulation</i>	71
4.4	<i>Fahrdynamikmodell und Reifenmodell</i>	72
4.5	<i>Fahrerstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle</i>	74
4.6	<i>Datenbasis und Verkehrssimulation</i>	75
5	Entwicklung einer Methode zur Konzipierung von Fahrsimulatoren	78
5.1	<i>Zusammenhang zwischen Sinnesreiz und Art der Fahraufgabe</i>	79
5.1.1	Einflussgrößen der Stabilisierungsaufgabe	79

5.1.2	Einflussgrößen der Bahnführungsaufgabe	87
5.1.3	Einflussgrößen sekundärer Aufgaben	89
5.1.4	Einflussgrößen tertiärer Aufgaben	91
5.1.5	Personenabhängige Einflussgrößen.....	92
5.2	<i>Klassifizierung der Simulatoranwendung</i>	94
5.2.1	Primär, Stabilisierung	96
5.2.2	Primär, Bahnführung	96
5.2.3	Primär, Navigation	97
5.2.4	Sekundäre Aufgaben	97
5.2.5	Tertiäre Aufgaben.....	98
5.3	<i>Ableitung typischer Ausführungen von Fahrsimulatoren</i>	99
5.3.1	Fertigkeitsbasierte Stabilisierung	99
5.3.2	Regelbasierte Bahnführung	104
5.3.3	Regel- und wissensbasierte Navigation.....	107
5.3.4	Regelbasierte sekundäre Aufgaben	109
5.3.5	Wissensbasierte sekundäre Aufgaben	113
5.3.6	Regel- und wissensbasierte tertiäre Aufgaben	114
6	Bestätigung der Methode	118
6.1	<i>Anwendung der Methode am FTM-Simulator</i>	118
6.2	<i>Sichtsimulation</i>	122
6.2.1	Abstands- und Geschwindigkeitswahrnehmung	122
6.2.2	Verwischungseffekte des Projektors	128
6.3	<i>Bewegungssimulation und Fahrdynamikmodell</i>	129
6.3.1	Fahrdynamikmodell.....	129
6.3.2	Versuchsspezifisches Motion-Cueing	130
6.4	<i>Geräuschsimulation</i>	130
6.5	<i>Fahrstand und Mensch-Maschine Schnittstelle</i>	133
6.6	<i>Datenbasis und Verkehrssimulation</i>	134
6.7	<i>Personenabhängige Variabilitäten</i>	136
6.7.1	Risikobewusstsein im Simulator	136
6.7.2	Nachlaufverhalten des Sattelauflegers	136
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	138
	Literaturverzeichnis.....	140
	Anhang	149

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Antizipation	„Vorausschau“ (lat.): Mittlere Ebene des 3-Ebenen Modells der Fahrzeugführung, welche vor allem die Festlegung der Soll-Geschwindigkeit und des Sollkurses auf der Basis des „im Voraus“ erkannten Straßenverlaufs und der Verkehrssituation umfasst.
BWS	Bewegungssystem
DEPP	Als Design-Eye-Point Position wird die Position der Augen des Fahrers im Simulator relativ zum Bildmedium bezeichnet, für den die Darstellung des Bildinhalts berechnet wird. Auch die physische Bilddarstellung ist auf diese Position hin optimiert.
DOF	Degree-Of-Freedom ; Freiheitsgrad
Fahraufgabe	Die Fahraufgabe im Kraftfahrzeug kann in primäre, sekundäre und tertiäre Tätigkeiten unterteilt werden: <ul style="list-style-type: none"> • Die primäre Fahraufgabe umfasst diejenigen Aktivitäten, welche für das Zustandekommen der Bewegung des Fahrzeugs notwendig sind, wozu neben der Regelung des Kurses in Längs- und Querrichtung auch planerische Tätigkeiten gehören. Die primäre Fahraufgabe kann weiter unterteilt werden in Stabilisierung (Kompensation), Bahnführung (Antizipation) und die Navigation. • Sekundäre Aufgaben tragen nicht zur Einhaltung des Kurses im regelungstechnischen Sinne bei, fallen aber verkehrs- und umweltbedingt an und stehen daher mit dem Fahrvorgang in Verbindung. • Tertiäre Aufgaben sind nicht durch die Fahraufgabe bedingt, sondern dienen dem Komfort, der Unterhaltung oder der Information während der Fahrt
FAS	Fahrerassistenzsystem
Fixed-Screen	Fixed-Screen bezeichnet ein Simulatorkonzept bei Simulatoren mit Bewegungssystem. Das Sichtsystem wird nicht durch das Bewegungssystem mitbewegt.
Flying-Screen	Flying-Screen bezeichnet ein Simulatorkonzept bei Simulatoren mit Bewegungssystem. Das Sichtsystem wird durch das Bewegungssystem mitbewegt.
HIL	Hardware-in-the-loop : Simulationsmethode, bei der Echtteile in einer Simulationsumgebung getestet werden. Typische Beispiele sind Prüfstände für ESP und Lenkungscomponenten.
HMD	Head-Mounted Display
Immersion	Als Immersion (lat. „Eintauchen“) wird die durch die physikalische Übereinstimmung der Sinnesreize in Simulation und Realität erzeugte Einbindung des Menschen in eine virtuelle Welt bezeichnet (s.a. Präsenzepfinden).
Kompensation	Als Kompensationsebene (lat. „Ausgleich“) wird die unterste Ebene des 3-Ebenen Modells der Fahrzeugführung bezeichnet, welche vor allem die Regeltätigkeit des Menschen an Fahrpedal, Bremspedal und Lenkrad im geschlossenen Regelkreis umfasst.
MKS Simulation	Mehrkörpersystem-Simulation : Bezeichnung für eine Simulationsmethode, bei der das technische System durch ein Simulationsmodell dargestellt wird, welches sich an der physischen Realität des Originalsystems orientiert.
MMS	Die Mensch-Maschine-Schnittstelle werden diejenigen Anzeige- und Bedienelemente bezeichnet, über die im Fahrzeug der Mensch mit dem Fahrzeug interagiert.
Navigation	Oberste Ebene des 3-Ebenen Modells der Fahrzeugführung, welche die planerische Kursbestimmung beinhaltet.
Optischer Fluss	Die Flächenanordnung der Objekte der Fahrumgebung, das so genannte „ <i>ambient optic array</i> “ verändert sich während der Fortbewegung. Die Veränderung der Bildinhalte lässt ein geschwindigkeitsabhängiges Vektorfeld entstehen. Ist die Veränderung des Vektorfeldes kontinuierlich, so spricht man von optischem Fließen .

- Präsenzempfinden** Das **Präsenzempfinden** ist eine personenabhängige Größe, welche den Grad des sich Einlassens auf die virtuelle Umgebung beschreibt. Risikoverhalten und subjektives Einlassen werden von der Präsenz des Fahrers bestimmt.
- Reiz-Reaktionsmechanismus** Den Reaktionen auf bestimmte Reize aus der Umgebung liegen sensomotorische oder intellektuelle Mechanismen zu Grunde:
- **Fertigkeitsbasierte Handlungen** sind die Reaktion auf adäquate Reize mittels automatisierter, sensomotorischer Verhaltensmuster. Es bedarf keiner bewussten, intellektuellen Interpretation der Reize.
 - **Regelbasierte Handlungen** bezeichnen das Vorgehen nach erlernten, gespeicherten Regeln, wenn während der Fahrt bestimmte Hinweisreize auftreten.
 - **Wissensbasierte Handlungen** sind gekennzeichnet durch den Entwurf von Handlungsstrategien für noch nicht erlebte Situationen auf der Basis von allgemeinem Wissen und mittels bewusster Interpretation der dargebotenen Information.
- Washout** Als **Washout** wird ein Rechenalgorithmus bezeichnet, der im Bewegungssystem aufgebaute Verfahrensgeschwindigkeiten abbaut und Auslenkungen des Bewegungssystems in die Nulllage zurückführt.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur Konzipierung von Fahrsimulatoren auf der Basis der Anwendung entwickelt. Ausgangspunkt der Methode sind die aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse über die Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen und die Reiz-Reaktionsmechanismen bei der Fahrzeugführung. Es werden die Zusammenhänge hergeleitet, welche erforderlich sind, um aus diesem Wissen über den Fahrvorgang anwendungsspezifisch Anforderungen an einen Fahrsimulator abzuleiten. Die Zusammenhänge werden durch Entwicklungsversuche am LKW-Fahrsimulator des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik bestätigt.

Während die primäre Fahraufgabe, also die Stabilisierung des Fahrzeugs, hauptsächlich durch sensomotorisch geprägte, nicht bewusst beeinflussbare Reaktionen bestimmt wird, ist dem Fahrer bei sekundären und tertiären Nebenaufgaben eine bewusste Einflussnahme auf seine Reaktionen möglich. Werden auf einem Simulator also Fragestellungen der primären Fahraufgabe untersucht, so sind nur geringe Abweichungen der Simulation von der Realität zulässig. Dagegen kann bei der Untersuchung von sekundären und tertiären Aufgabenstellungen, wie sie für den Bereich der Fahrerassistenz und der Mensch-Maschine-Schnittstelle typisch sind, eine Abweichung der Simulation von der Realität zulässig sein. Entsprechend diesem Kerngedanken werden die verschiedenen Anwendungstypen aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik klassifiziert und für jede dieser Klassen eine geeignete Simulatorkonfiguration beschrieben.

Für Planer und Nutzer von Fahrsimulatoren werden die funktionalen Zusammenhänge zwischen Simulatortechnik und fahrzeugtechnischer Anwendung sichtbar, sodass Entscheidungen über die Ausprägung des Prüfstands nachvollziehbar getroffen werden können. Die Methode besitzt einen Detaillierungsgrad, der die Kosten bestimmenden Komponenten und Merkmale des Prüfstands ausreichend genau beschreibt, um den notwendigen Invest zu bestimmen. Ein zweiter Aspekt der Arbeit ist die Möglichkeit, die Tauglichkeit einer bestehenden Anlage hinsichtlich einer neuen Anwendung zu prüfen. Fehlende Leistungsmerkmale können mittels einer einfach strukturierten Einordnung der neuen Anwendung bestimmt werden, sodass eine fundierte Gegenüberstellung von Kosten und Zusatznutzen erfolgen kann. Die Auswirkungen der Simulatortechnik auf das Fahrerverhalten und damit auf die fahrzeugtechnische Anwendung werden sichtbar gemacht.

1 Einleitung – Problemstellung und Zielsetzung

Erste Versuche, Fahr simulatoren in der Fahrzeugentwicklung einzusetzen, fanden in den 1970er Jahren statt. Bei diesen Anlagen stand die Nachbildung der primären Fahraufgabe im Sinne der Quer- und Längsdynamik im Vordergrund. Diese Anwendung stellt, wie sich in der Arbeit zeigen wird, die höchsten Anforderungen an die Qualität der Simulation. Es zeigte sich, dass trotz verschiedener Ansätze zur Verbesserung der Bewegungssimulation, die Bewegungssysteme nicht in der Lage waren, die Beschleunigungen aus der Realfahrt so darzustellen, dass eine Beurteilung der Fahrdynamik möglich wurde. Die Anlagen stießen aufgrund der unrealistischen Bewegungssimulation auf geringe Akzeptanz.

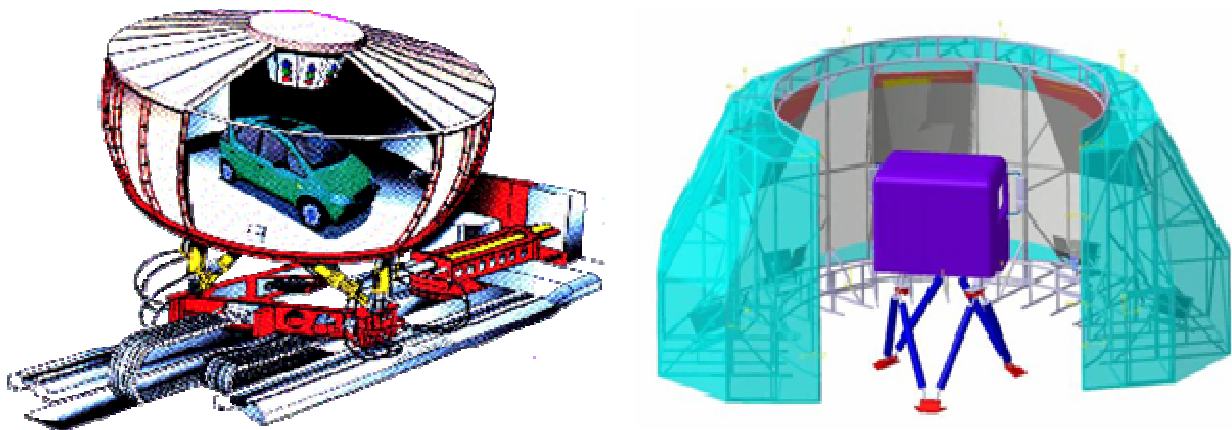


Abbildung 1-1: Daimler-Chrysler Fahr simulator (1984, links) und FTM-Fahr simulator (2004, rechts)

Die heutige Verbreitung der Fahr simulation in der Fahrzeugtechnik ist zum einen auf die Verbesserung der Simulatortechnik zurückzuführen, beruht aber vor allem auf dem Wandel des Einsatzgebiets. Üblicherweise werden die Anlagen heute verwendet, um die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion zu untersuchen. Die Nachbildung der Fahraufgabe ist für diese Aufgaben zwar nach wie vor erforderlich, dient aber jetzt dazu, eine der Realfahrt vergleichbare Grundbelastung zu erzeugen. Aus diesem Wandel resultiert ein verändertes Anforderungsprofil an die Anlagen, was entsprechend veränderte Simulator konzepte zur Folge hat. (Abbildung 1-1).

Fahr simulatoren in der Fahrzeugentwicklung zählen zu den komplexesten Prüfständen eines Fahrzeugherstellers. Das erforderliche Know-How zur Entwicklung einer solchen Anlage erstreckt sich von den Technologien zur Bilderzeugung über die Bewegungssimulation bis hin zu

physiologischen und psychologischen Aspekten. Die meisten dieser Technologien fallen nicht in die Kernkompetenz eines Fahrzeugherstellers. Die Entwicklung und Integration der Simulatoren wird daher meist von einem Zulieferer geleistet. Ohne grundlegendes Wissen über die Simulatortechnik ist aber auch die Einschätzung über die Tauglichkeit eines Simulators für eine Entwicklungsaufgabe schwierig. So ist schon die Spezifikation eines Simulators für den Fahrzeughersteller mit großem Aufwand und schwer einzuschätzenden funktionalen und finanziellen Risiken behaftet.

Veröffentlichungen aus dem Bereich der Simulatortechnik sind bei der Anlagenkonzipierung nur bedingt hilfreich, da sie sich meist nur mit Teilaspekten der Simulatortechnik befassen. Zudem ist der Bezug zur konkreten fahrzeugtechnischen Anwendung nicht in einer Form gegeben, die für die Ableitung eines Simulator-Gesamtkonzepts erforderlich ist. Ziel der Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methode, welche es dem Anwender aus der Fahrzeugtechnik ermöglicht, ein maßgeschneidertes Simulatorkonzept zu formulieren.

Der Zusammenhang zwischen den Anforderungen einer Anwendung und den Merkmalen der Simulatortechnik wird in dieser Arbeit in einer für den Fahrzeugtechniker nachvollziehbaren Form beschreiben. Der Detaillierungsgrad der mittels der Methode abgeleiteten Spezifikation ist hoch genug, um die funktionalen und finanziellen Risiken zu minimieren. In der Arbeit werden sechs typische Simulatorkonzepte entwickelt. Aus diesen Grundtypen kann der Anwender durch Kombination ein für ihn geeignetes Profil ableiten. Die Arbeit beinhaltet das Expertenwissen, welches für die sinnvolle Kombination der Grundtypen erforderlich ist.

Das Wissen um die Zusammenhänge entstand am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München durch die Konzipierung und den Bau eines dynamischen LKW-Fahrsimulators. Die Zusammenarbeit zwischen Lehrstuhl, Simulator- und LKW-Hersteller bei Aufbau und Betrieb dieser Anlage ermöglichte es, die durch Literaturrecherche gewonnenen Grundlagen durch anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu einer Methode weiterzuentwickeln.

Aufbau der Arbeit

Der Fahrsimulator in der Fahrzeugtechnik ist ein Prüfstand zum Test von Systemen im geschlossenen Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt (closed-loop). Das erste Grundlagenkapitel beschreibt daher die Erkenntnisse über die Rolle des Menschen in diesem geschlossenen Regelkreis, also den Vorgang der Fahrzeugführung. Dabei werden zwei etablierte Einteilungen in Zusammenhang mit dem Fahrvorgang eingeführt. Dies ist zum einen die Unterteilung in primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben des Menschen im Regelkreis. Zum anderen kann, je nach Art der erforderlichen Aktion und der Erfahrung des Fahrers, den Handlungen ein fertigkeit-, regel- oder wissensbasierter Reiz-Reaktions-Mechanismus zu Grunde liegen. Die durch diese Einteilungen aufgespannte zweidimensionale Matrix ermöglicht im Syntheseteil der Arbeit, eine Klassifizierung der Fahrsimulator-Anwendungen, um zielgerichtet für die einzelnen Klassen geeignete Simulator Konzepte ableiten zu können.

Der Fahrer ist zentraler Bestandteil des o.g. Regelkreises, weshalb dessen sensorische Fähigkeiten in einem weiteren Grundlagenkapitel beschrieben werden. Diese Fähigkeiten bestimmen die Anforderungen an die Qualität der in einem Fahrsimulator erzeugten Sinnesreize, wie z.B. Bildinformationen oder Bewegungen. Neben den Fähigkeiten und Grenzen der Wahrnehmung wird auch beschrieben, wie die Wahrnehmungen als Führungs- oder Störgrößen in den geschlossenen Regelkreis eingehen und welche Reaktionen dadurch ausgelöst werden.

Das Kapitel zum Stand der Technik bietet zunächst einen Überblick über das heutige Anwendungsspektrum der Fahrsimulation auch über die Fahrzeugtechnik hinaus. Anschließend wird die Technik der Fahrsimulation, die mögliche Ausführung einzelner Komponenten und deren Beitrag zur Simulationsgüte erläutert. Das Kapitel zeigt auf, wie gut die derzeit verfügbare Simulatortechnik in der Lage ist, die für die Fahrt erforderlichen Sinnesreize zu erzeugen.

Die Erkenntnisse aus der Konzipierung und dem Bau des dynamischen LKW-Simulators am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik bilden das Fundament der Methode zu Konzipierung von Fahrsimulatoren. Aus diesem Grund sind die Ausführungen seiner Teilsysteme und das Gesamtkonzept des entstandenen Prüfstands beschrieben. Die Beschreibung besitzt einen Detaillierungsgrad, wie er auch durch die im folgenden Kapitel entwickelte Methode beschrieben wird.

Den Kern der Arbeit bildet das Kapitel 5, in dem der Zusammenhang zwischen der Art der Anwendung und den durch die Simulatortechnik erzeugten Sinnesreizen hergestellt wird. Dieser Zusammenhang wird auf der Basis des Wissens um den Fahrvorgang und der Simulatortechnik hergestellt. Dazu wird aus den in Kapitel 2.1 vorgestellten Einteilungen des Fahrvorgangs eine Klassifizierung aller möglichen Anwendungen hergeleitet. Einige der gebildeten Klassen sind theoretischer Natur und stellen Sonderfälle dar, die in der Regel für die Fahrzeugentwicklung von geringer Bedeutung sind (z.B. Lenkverhalten von Fahranfängern in hochdynamischen Fahr-situationen). Sie werden in der Methode nur kurz beschrieben. Für die sinnvoll besetzten, typischen Anwendungsklassen werden Anforderungsprofile abgeleitet und das vollständige Konzept des Fahrsimulators beschrieben.

Der der Methode zugrunde liegende Zusammenhang zwischen Anwendung und Simulatortechnik wird im nächsten Kapitel durch die Ergebnisse aus verschiedenen Versuchsreihen am FTM-Simulator bestätigt. Um das für die frühe Phase der Simulatorkonzipierung sehr hilfreiche ergänzende Erfahrungswissen aus dem Aufbau und dem zweijährigen Betrieb der Anlage nicht verloren gehen zu lassen, werden in der Arbeit auch Hinweise eingebracht, die nicht durch eine eigene Versuchsreihe bestätigt werden. Wo dies der Fall ist, wird es durch eine entsprechende Formulierung kenntlich gemacht.

2 Grundlagen – Fahrzeugführung und menschliche Wahrnehmung

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie der Fahrer im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt agiert bzw. reagiert und welche Sinnesreize diesen Aktionen zu Grunde liegen. Für diese Aktionen hat sich die Einteilung in primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben etabliert. Sie können auf verschiedenen Reiz-Reaktions-Mechanismen beruhen, welche, in Abhängigkeit von der Fahrerführung, eine mehr oder weniger große Zuwendung des Fahrerbewusstseins erfordern. Die ebenfalls etablierte, in der Ergonomie verwendete Einteilung dieser Mechanismen in fertigkeit-, regel- und wissensbasierte Reaktionen wird in Kapitel 2.1.2 erläutert.

2.1 Fahrzeugführung

Das dynamische Zusammenspiel von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt beim Prozess der Fahrzeugführung ist durch einen geschlossenen Wirkungskreislauf, den sog. Regelkreis, gekennzeichnet (Abbildung 2-1). Die Führungsgröße wird durch die Umwelt in der Form des Straßenverlaufs, der Verkehrssituation und der darin auftretenden Störungen, wie z.B. Straßenschäden, vorgegeben. Der Fahrer nimmt diese Führungsgrößen mit seinen Sinnen wahr und leitet daraus einen Soll-Kurs und eine Soll-Geschwindigkeit ab. Durch seine Bedieneingaben an der Regelstrecke „Fahrzeug“ versucht er, diesen Soll-Fahrzustand stabil einzuregeln. Abweichungen des tatsächlichen Zustands von der Wunschvorstellung werden im geschlossenen Regelkreis zurückgeführt und der Führungsgröße aufgeschaltet. Ein Fahr Simulator ermöglicht, mit Einschränkungen, die Simulation dieses Regelkreises. Dabei werden die Umwelt und Teile des Fahrzeugs simuliert. Nur der Mensch und die für Fahraufgabe und Nebenaufgaben erforderlichen Teile des Fahrzeugs verbleiben als Echteile. [28]

Der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen des Reglers Mensch und den Ausgangsgrößen, also seinen Bedienhandlungen, ist die Basis für die später entwickelte Methode. Um später beurteilen zu können, ob die Verbesserung der Eingangsgröße, also z.B. der Sichtsimulation, eine Verbesserung der Fahrerreaktion zur Folge hat, ist die Kenntnis der inneren Struktur dieses Reglers erforderlich. Der deterministische Anteil dieser Reglereigenschaften wird in den folgenden beiden Kapiteln beschrieben. Tatsächlich wird das Regelverhalten aber nicht nur vom Straßenverlauf und der vorgeschriebenen Geschwindigkeit bestimmt, sondern auch in einer nicht deterministischen Weise von der komplexen menschlichen Informationsaufnahme und

-verarbeitung und damit von der Person des Fahrers. Neben den nicht-deterministischen Reglereigenschaften wird durch den Mensch auch nicht aufgabenbezogenes Verhalten in den Regelkreis induziert [28]. Die Fähigkeit und die Bereitschaft, sich in die Simulation einzulassen und diese mental als den Regelvorgang „Fahrt im Kraftfahrzeug“ zu akzeptieren sowie soziale Aspekte bestimmen diesen Anteil.

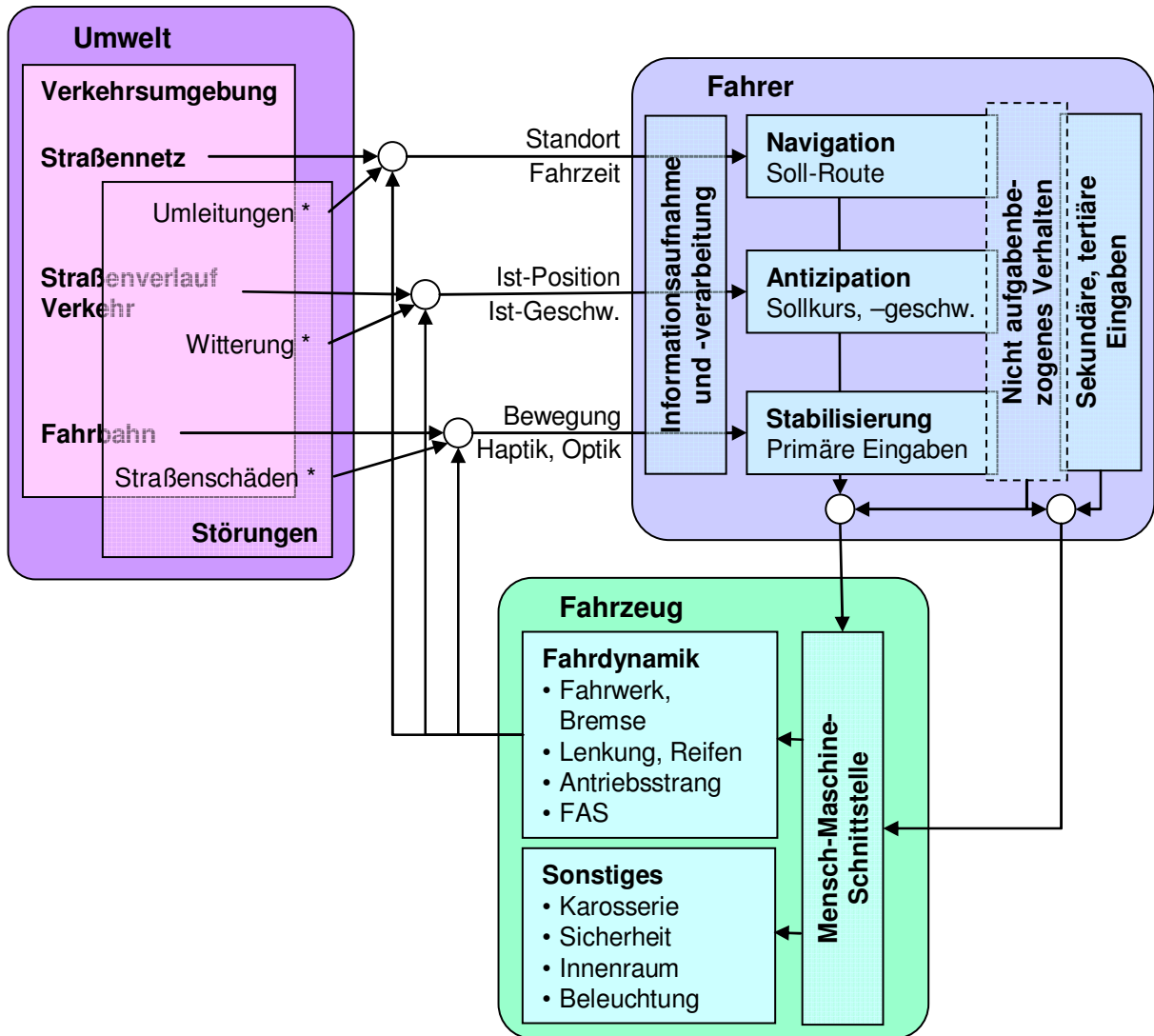


Abbildung 2-1: Blockschaftbild des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt. *) Beispiele

Die nicht-deterministischen und nicht-aufgabenbezogenen Anteile des Verhaltens erstrecken sich auf alle Arten von Handlungen des Fahrers und werden bei den Betrachtungen zur Personenabhängigkeit von Simulatorversuchen in Kapitel 5.1.5 genauer beschreiben. Der für die Methode entwickelte Zusammenhang zwischen der erforderlichen Güte der erzeugten Sinnesreize und dem Regelverhalten basiert auf dem deterministischen und aufgabenbezogenen Anteil dieses Verhaltens. Diese Anteile werden im Folgenden aus veröffentlichten Versuchsergebnissen in Zusammenhang mit der physiologischen Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen bestimmt.

2.1.1 Aspekte der Fahraufgabe

Alle Regeltätigkeiten und Aktivitäten der Fahrzeugführung werden in der Literatur in primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben unterteilt. Abbildung 2-2 zeigt diese drei Bereiche im Überblick und entsprechende Handlungsbeispiele. In der Grafik wird auch das gebräuchliche Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung eingeführt, welches die primäre Fahraufgabe in Navigation, Bahnführung und Stabilisierung untergliedert [4, 82]. Die Inhalte der einzelnen Ebenen werden im Folgenden erläutert.

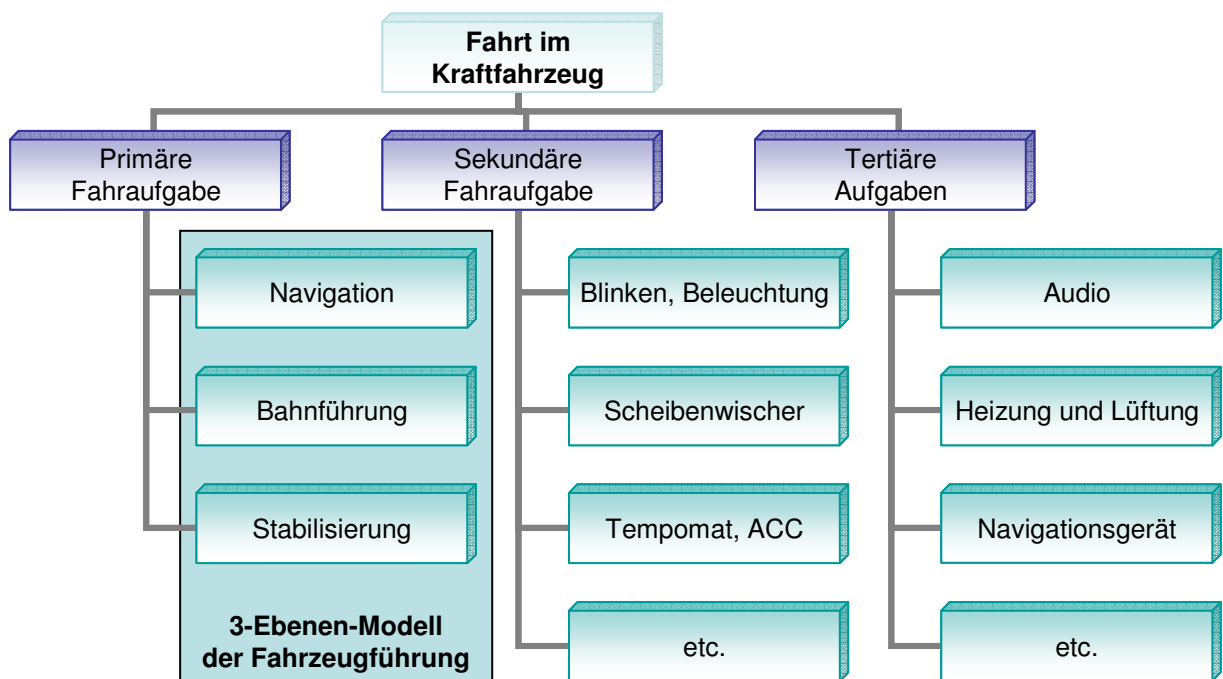


Abbildung 2-2: Beispiele für primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben bei der Fahrt im Kraftfahrzeug

Primäre Aufgabe

Die primäre Fahraufgabe umfasst diejenigen Aktivitäten, welche für das Zustandekommen der Bewegung des Fahrzeugs notwendig sind, wozu neben der Regelung des Kurses in Längs- und Querrichtung auch planerische Tätigkeiten gehören. Dies resultiert in der Wahl der Fahrtroute (Navigation), der mentalen Festlegung eines Fahrkurses (Bahnführung) und in der Realisierung eines an den Sollkurs angelehnten Ist-Kurses durch die Betätigung von Lenkrad, Bremse und Fahrpedal (Stabilisierung). In die Fahrzeugstabilisierung gehen auch antizipatorische Größen aus der Bahnführungsebene mit ein. Die Inhalte dieser drei Ebenen werden im Folgenden beschrieben [15, 17, 28]:

- Navigationsebene: Treiber für eine Fahrt ist der Wunsch zum Ortswechsel, also ein motivatorischer Aspekt. Sie umfasst die Makroorientierung durch die Wahl der Fahrtroute und die Planung der dafür benötigten Zeit.

- **Bahnführungsebene:** Wenn in den Regelungsprozess Informationen über den zukünftigen Verlauf der Führungsgröße einfließen, so handelt es sich um eine antizipatorische Situation. Die Gegebenheiten der Verkehrssituation, wie Fahrbahnmarkierungen, Beschilderung, Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer, setzt der Fahrer in eine detaillierte Spezifikation von Sollkurs und Sollgeschwindigkeit um. Der Sollkurs ist nicht eindeutig, sondern gibt einen zulässigen Bewegungsbereich vor. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang die sog. „entscheidungsorientierten Parameter“ genannt. Dabei werden aus den Hinweisreizen der Fahrumgebung mental Größen gebildet, welche zur Festlegung von Spur und Geschwindigkeit herangezogen werden. Die entscheidungsorientierten Parameter sind der Sekundenabstand zum Vorausfahrenden, die „Time-to-Line-Crossing“ (TLC) und die „Time-To-Collision“ (TTC). Diese Parameter bestimmen den antizipatorischen Anteil der auf der kompensatorischen Ebene eingesteuerten Fahrereingaben der primären Fahraufgabe. Wenn diese Größen den vom Fahrer gewünschten Wertebereich verlassen und eine Anpassung des Bewegungszustandes erforderlich wird, leitet der Fahrer diese in der Bahnführungsebene ein und kontrolliert deren Wirksamkeit auf der untergeordneten Stabilisierungsebene. Nur die Fernsinne des Menschen, also Gesichtssinn und Gehörsinn können zur Antizipation beitragen.
- **Stabilisierungsebene:** Auf dieser Ebene wird der zu regelnde Prozess in einem stabilen Zustand gehalten, sodass er möglichst genau dem mental festgelegten Sollzustand entspricht. Bei der kompensatorischen Regelung vergleicht der Mensch den augenblicklichen Zustand hinsichtlich Position und Geschwindigkeit mit den zuvor mental festgelegten Größen und passt diese an die Sollwerte an. Neben dem Gesichtssinn werden jetzt auch haptische und vestibuläre Informationen zur Regelung herangezogen. Physischer Aufwand tritt in diesem Drei-Ebenen Modell nur auf der Stabilisierungsebene durch die Betätigung von Fahrpedal, Bremspedal und Lenkrad auf.

Sekundäre Aufgaben

Sekundäre Aufgaben tragen nicht zur Einhaltung des Kurses im regelungstechnischen Sinne bei, fallen aber verkehrs- und umweltbedingt an und stehen daher mit dem Fahrvorgang in Verbindung. Sie können in aktiv und reaktiv bedingte Aufgaben unterteilt werden. Aktive Aufgaben dienen der Kommunikation mit der Verkehrsumwelt z.B. durch Blinken, Ablenden und Hupen. Reaktive sekundäre Handlungen erfolgen aufgrund der Verkehrssituation. Dazu zählen neben Kuppeln und Schalten beispielsweise auch die Betätigung von Licht und Scheibenwischer. Auch Fahrgeschwindigkeitsregler und andere quer- oder längsdynamisch wirksame Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind für den Fahrvorgang relevant und zählen daher zur sekundären Ebene [82].

Tertiäre Aufgaben

Tertiäre Aufgaben sind nicht durch die Fahraufgabe bedingt, sondern dienen dem Komfort, der Unterhaltung oder der Information während der Fahrt. Darunter ist die Bedienung von Radio,

Telefon, Heizung, Klimaanlage sowie der gesamte Bereich der Unterhaltungselektronik und der Informations- und Navigationssysteme einzuordnen [82].

2.1.2 Reiz-Reaktionsmechanismen bei der Fahrzeugführung

Je nach der Art der Aufgabe und der Erfahrung des Fahrers werden bei der Ausübung primärer, sekundärer und tertiärer Aufgaben unterschiedliche physiologische und psychologische Reiz-Reaktions-Mechanismen wirksam. Die Kenntnis dieser Mechanismen ist erforderlich, um beurteilen zu können, ob und wie gut ein Simulator den adäquaten Reiz zur Auslösung der gewünschten Handlung des Fahrers erzeugen kann. Es hat sich eine Unterscheidung in drei Arten von Reaktionen etabliert [83]:

Fertigkeitsbasiertes Verhalten

Als fertigkeitbasiertes Verhalten wird die Reaktion auf adäquate Reize mittels automatisierter, sensomotorischer Verhaltensmuster bezeichnet. Es bedarf keiner bewussten, intellektuellen Interpretation der Reize, sodass fertigkeitbasierte Reaktionen im Bereich weniger Zehntelsekunden erfolgen können. Bei erfahrenen Fahrern trifft dies auf die meisten Handlungen der Stabilisierungsebene zu. Je breiter das durch Fahrerfahrung abgedeckte Spektrum an bekannten Reizen antrainierten Reaktionen ist, desto besser kann ein Fahrer auf diese Reize unwillkürlich reagieren. Dies bedeutet, dass erfahrene Fahrer eine größere Zahl an potentiell gefährlichen Situationen schneller und damit besser entschärfen können. Die Tatsache, dass eine fertigkeitbasierte Reaktion nicht bewusst ausgelöst werden muss, hilft dem Fahrer im realen Verkehr, bedeutet aber - wie später gezeigt wird - eine große Schwierigkeit für die Fahrsimulation. Nur wenn die auslösenden Sinnesreize, wie z.B. Beschleunigungen oder Lenkmomente, unverfälscht nachgebildet werden, wird der Fahrer auch wie im realen Fahrzeug reagieren.

Regelbasiertes Verhalten

Als regelbasiertes Verhalten wird das Vorgehen nach erlernten, gespeicherten Regeln bezeichnet, wenn während der Fahrt bestimmte Hinweisreize auftreten. Die Geschwindigkeitswahl eines erfahrenen Fahrers auf einer unbekanntem Fahrstrecke ist ein typisches Beispiel für regelbasiertes Verhalten. Da es sich nicht um sensomotorische Vorgänge handelt, ist ein bewusster Eingriff des Fahrers auf den Vorgang und die Anpassung der Regel an die gegebene Situation leichter möglich als auf fertigkeitbasierter Ebene. Die Auslösung einer regelbasierten Reaktion erfolgt weniger schnell, als das auf fertigkeitbasierter Ebene der Fall ist.

Wissensbasiertes Verhalten

Wissensbasiertes Verhalten ist gekennzeichnet durch den Entwurf von Handlungsstrategien für noch nicht erlebte Situationen auf der Basis von allgemeinem Wissen und mittels bewusster Interpretation der dargebotenen Information. Ein Beispiel ist die räumliche Orientierung und Routenplanung anhand bekannter Bauwerken oder Straßenkarten. Dieser Wahrnehmungs- und

Interpretationsprozess erfordert eine intellektuelle Leistung des Fahrers, sodass eine Reaktion auf wissensbasierter Ebene mehrere Sekunden in Anspruch nehmen kann.

Die Zuordnung von Tätigkeiten zu diesen Kategorien geht fließend ineinander über. Durch Fahrerfahrung verschieben sich Handlungen von der wissens- nach der regelbasierten Ebene, wie z.B. Ablenden als Reaktion auf den Lichtreiz des Gegenverkehrs. Ausschlag gebend dafür ist der Neuigkeitsgrad des dargebotenen Reizes. So kann sich die gesamte Bandbreite der Reaktionen hin zur wissensbasierten Ebene verschieben, wenn ein Fahrer ein ihm unbekanntes Fahrzeug mit veränderten Bedien- und Anzeigenelementen handhaben muss. Durch die Möglichkeit des bewussten Zugriffs und die Anpassung des bestehenden Regelwerks auf neue Situationen, stellen veränderte Randbedingungen hinsichtlich regel- und wissensbasierter Reaktionen kein größeres Problem dar. Fahrer sind es gewohnt, dass diese Randbedingungen veränderbar sind und können ihr Verhalten dementsprechend anpassen. Dies trifft auf die meisten Inhalte der Bahnführung, Navigation sowie der sekundären und tertiären Ebene zu. Am wenigsten berührt diese Verschiebung jedoch die Stabilisierung innerhalb der primären Fahraufgabe, da die entsprechende Bedienschnittstelle bei allen Fahrzeugen weitestgehend übereinstimmt. Zudem können aufgrund des physisch eingepprägten Reaktionsmechanismus diese fertigkeitbasierten Handlungen im Sinne einer Fahrsimulation besonders schwer manipuliert werden. [70]

Für die Anwendung der Fahrsimulation bedeutet dies, dass z.B. Fahrverhaltensbeurteilungen im Simulator nur dann sinnvoll sind, wenn die zu Grunde liegenden Sinnesreize identisch mit denen der Realität sind. Untersuchungen neuer Bedienelemente im Simulator sind dagegen auch dann denkbar, wenn die zur Nachbildung der primären Fahraufgabe erforderlichen Sinnesreize von der Realität abweichen. Während im einen Fall ein sensomotorisch abgelegtes Muster die Basis für die Reaktion ist, bietet sich dem Fahrer im anderen Fall die Möglichkeit des bewussten Zugriffs auf seine Reaktion. Er kann dann die unzureichenden Sinnesreizungen gedanklich ergänzen und ausgleichen. Diese Erkenntnis ist ein Kerngedanke der in Kapitel 5 entwickelten Methode, da sie mitbestimmend ist, inwieweit in der Simulation ein Reiz verfälscht dargestellt werden kann, ohne dass die Reaktion des Fahrers unzulässig verfälscht wird.

Im Folgenden wird erläutert, wie der Mensch mit seinen Sinnen die Reize aus der Umwelt wahrnehmen kann, welche die beschriebenen Reaktionen auslösen.

2.2 Menschliche Wahrnehmung

Die für das Verhalten des Menschen im Straßenverkehr relevante Informationsaufnahme erfolgt über 4 Sinneskanäle. Von diesen ermöglichen nur der Gesichtssinn und der Gehörsinn eine zeitliche und räumliche Vorausschau und Vorausplanung, also ein antizipatorisches Verhalten. Um die Regelung auf die bevorstehende Situation anzupassen, sind diese Fernsinne für den Fahrvorgang mit seinen hohen Geschwindigkeiten von besonderer Bedeutung. Für die Wahrnehmung des momentanen Fahrzustandes werden dagegen verstärkt der Gleichgewichtssinn und die Hautsinne herangezogen. Sie sind maßgebend für die Fahrzeugstabilisierung [4, 44].

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften und Wahrnehmungsgrenzen der menschlichen Sinne aufgezeigt.

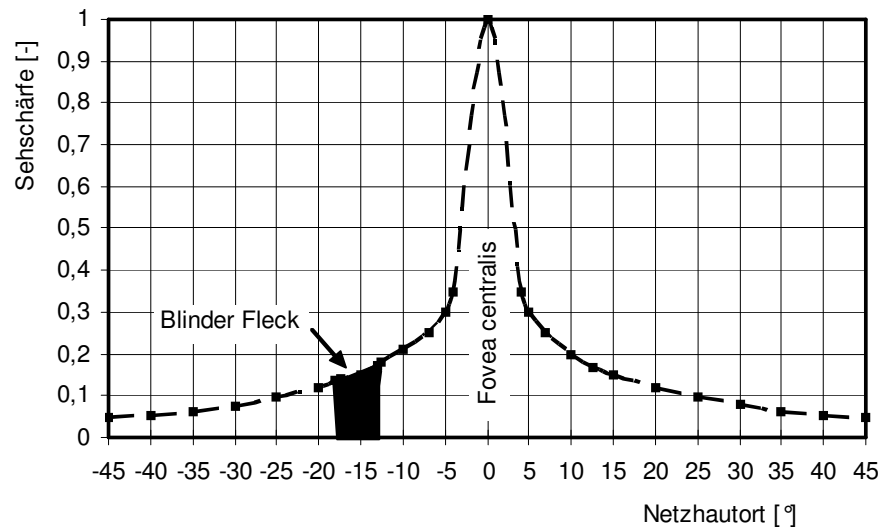
2.2.1 Gesichtssinn

Die visuelle Wahrnehmung liefert zu mehr als 90% die für die Fahraufgabe erforderlichen Informationen [82]. Mit dem Gesichtssinn nimmt der Fahrer neben seiner eigenen Position und Bewegung auch die Position und Bewegung anderer Objekte wahr und ermöglicht damit als zeitlich und räumlich vorausorientierter Fernsinn die Anpassung einer Reaktion auf eine erkannte, zukünftige Störung [71]. Im Weiteren werden diejenigen Eigenschaften des menschlichen Auges beschrieben, welche für den Fahrvorgang und damit für die Auslegung der Sichtsimulation relevant sind.

Sehschärfe

Die Sehschärfe ist definiert durch die Fähigkeit des optischen Apparats, zwei Punkte, die sich in seitlichem Abstand voneinander befinden, noch als getrennte Punkte unterscheiden zu können. Sie beträgt dann 1, wenn zwei Punkte mit einem Winkelabstand von einer Winkelminute noch unterschieden werden können [44].

Abbildung 2-3: Sehschärfe des menschlichen Auges [44]



Idealerweise ist die Größe der Bildpunkte, welche durch die Auflösung der Sichtsimulation gegeben ist, geringer als das durch die Sehschärfe bestimmte Auflösungsvermögen. Diese physiologische Eigenschaft unterliegt Einflüssen, die bei der Spezifikation der Sichtsimulation genutzt werden können, wenn eine entsprechend hohe Auflösung aus finanziellen oder technischen Gründen nicht realisiert werden kann. So nimmt die Sehschärfe gegen den Rand der Netzhaut hin stark ab (Abbildung 2–3), sodass es zulässig sein kann, für den peripheren Sichtbereich eine niedrigere Bildauflösung zu wählen, ohne die Anlagentauglichkeit zu beeinträchtigen. Die Seh-

schärfe lässt im Dunkeln nach und hängt von der Farbe des Lichtes ab. Die Sehschärfe des Menschen nimmt außerdem ab, wenn sein Körper Schwingungen ausgesetzt ist¹. Diese Eigenschaften sind als ergänzende Informationen für den Betrieb eines Simulators gedacht und sind für die Optimierung der Sichtsimulation weniger relevant [44, 92].

Gesichtsfeld

Das Gesichtsfeld ist in geringem Maß von der Farbe des Lichtes abhängig und beträgt für weißes Licht in horizontaler Richtung 180° bis 200° (Abbildung 2-4). Mit der Drehung des Auges sind bis zu 220° möglich. Ein einzelnes Auge besitzt ein um ca. 15° nach außen gekehrtes Gesichtsfeld von ungefähr 150°. Durch die Beweglichkeit des Kopfes und des Körperrumpfes, kann mit zwei Augen der gesamte umgebende Raum eingesehen werden.

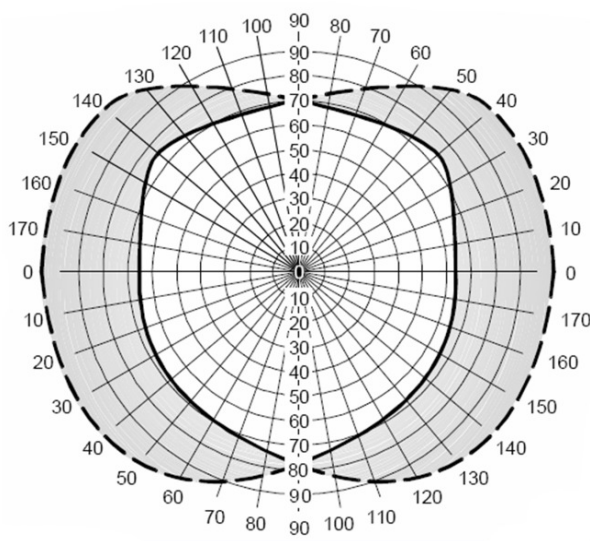


Abbildung 2-4: Binokulares Gesichtsfeld des Menschen

Das binokulare räumliche Sehen und das horizontale Gesichtsfeld werden allgemein als weniger wichtig für die Fahrzeugführung angesehen. Gemäß den gesetzlichen Vorschriften genügt für die Teilnahme im Straßenverkehr ein Gesichtsfeld von 140° [4, 44, 92].

Diese Regelung impliziert, dass die für

die Fahrzeugführung erforderlichen Wahrnehmungen auch für Einäugige mit einem Sichtbereich von ca. 140° möglich sind.

Tiefenwahrnehmung

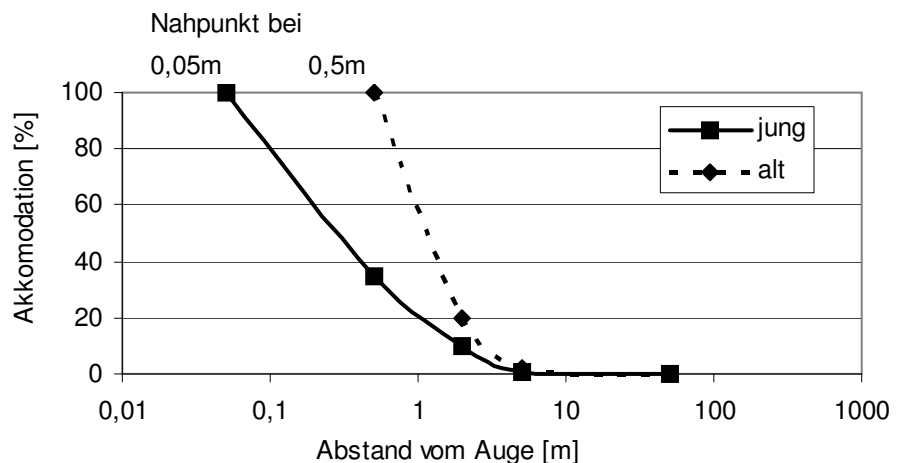
Die Wahrnehmung von Abständen ist für die antizipatorische und die kompensatorische Fahrzeugführung sehr wichtig und wird durch verschiedene optische Mechanismen bestimmt. Die Tiefenwahrnehmung, welche durch die so genannte „Querdisparation“, also die Wahrnehmung zweier leicht verschiedener Bilder in den beiden Augen entsteht, wird auch als „simultane Parallaxe“ oder „Stereosehen“ bezeichnet. Die simultane Parallaxe ist für die Tiefenwahrnehmung im Bereich bis fünf (maximal zehn) Metern relevant. Bei höheren Betrachtungsdistanzen hat das Stereosehen keine Bedeutung mehr für die Tiefenwahrnehmung. In diesem Bereich wird sie durch die sukzessive Parallaxe oder Bewegungsparallaxe ersetzt, welche auch mittels mono-

¹ Abnahme der Sehschärfe bei Schwingungseinfluss: 10Hz: -8,1%, 18Hz: -10,2%, 23Hz: -13.2%

kularen Sehens möglich ist. Diese entsteht, wenn durch Bewegung das gleiche Bild kurz hintereinander an verschiedenen Stellen der Netzhaut abgebildet wird [17, 44].

Die Tiefenwahrnehmungsschärfe, welche durch die Akkomodation des Auges entsteht, ist ein weiterer Mechanismus der Abstandswahrnehmung. Als Akkomodation wird die Einstellung des Auges auf die Entfernung des betrachteten Gegenstands durch Änderung der Linsenkrümmung bezeichnet. Dabei wird nicht nur eine Entfernung scharf abgebildet, sondern ein Bereich vor und hinter dieser Distanz. Je nachdem, welche Gegenstände bei einer Akkomodationsstufe noch scharf abgebildet werden, entsteht ein Entfernungseindruck. Beim Mensch beträgt dieser Bereich bei einem Betrachtungsabstand von 20cm etwa 1,2cm bei 5m schon 15m und wird bereits ab 10m unendlich. Der bei maximaler Akkomodation, also maximaler Anspannung der Linse, noch scharf gesehene Punkt ist der sog. Nahpunkt, der bei jungen normalsichtigen Menschen zwischen 0,05m und 0,09m liegt und im Alter auf 0,5-0,8m ansteigen kann. Von einem entspannten Auge werden parallele Strahlen auf der Netzhaut scharf abgebildet, was für Entfernungen von größer als fünf Metern gilt. Die Akkomodation ist demnach beim Nahpunkt maximal und wird bereits ab ca. fünf Metern zu Null, sodass das Auge völlig entspannt ist [44, 92]. Daraus kann der in Abbildung 2-5 dargestellte Verlauf abgeleitet werden. Es wird deutlich, dass bereits bei Entfernungen von zwei bis drei Metern bis zu 95% der Akkomodationsstrecke durchlaufen werden. Diese Tatsache wird bei der Auslegung des Sichtsystems für die Wahl des Abstands des Bildmediums relevant.

Abbildung 2-5: Näherungsweise Verlauf der Akkomodation des menschlichen Auges



Ein weiterer Anhaltspunkt für die Entfernungseinschätzung ist die Tatsache, dass sich beim Blick aus dem fahrenden Fahrzeug weit entfernte Objekte langsamer bewegen als nahe gelegene. Speziell im Straßenverkehr gewinnen zudem die absolute Größe von Objekten, der Licht- und Schattenwurf, die teilweise Verdeckung von entfernten Objekten durch näher liegende und eine durch Lichtabsorption bedingte Veränderung der Farbwahrnehmung entfernter Gegenstände, wie z.B. blaue Berge, an Bedeutung. Es wird angenommen, dass ein Betrachter auch die Struktur des Bodens zur Entfernungsschätzung heranzieht [17, 44, 71, 92].

Adaptation

Die Adaptation ist die Anpassung des Auges an verschiedene Beleuchtungsstärken. Sie spielt für die Auslegung der Sichtsimulation keine Rolle, wenn sie nicht konkreter Untersuchungsgegenstand ist. Dies kann z.B. bei Untersuchungen zur Blendempfindlichkeit bei Gegenlicht oder Sonneneinstrahlung oder bei der Einfahrt in schwach beleuchtete Tunnel der Fall sein.

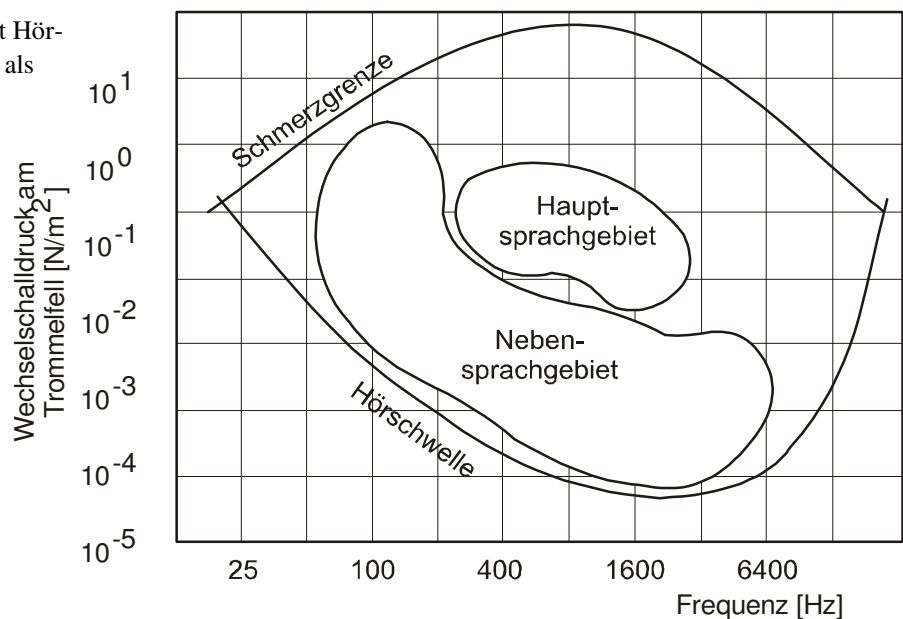
2.2.2 Gehörsinn

Der Gehörsinn ist der zweite Fernsinn des Menschen und ermöglicht eine Wahrnehmung auch dann, wenn z.B. durch Blickabwendung oder Verdeckung kein Sichtkontakt zur Schallquelle besteht. Mit dem Gehörsinn werden auch Informationen über den Betriebszustand des Fahrzeugs wahrgenommen. Für die Fahrt im Kraftfahrzeug ist die unterschiedliche Empfindlichkeit des Gehörs bei verschiedenen Frequenzen (Abbildung 2-6) und vor allem die Arten der auftretenden Geräusche wie z.B. Motorgeräusch, Reifenquietschen oder akustische Signale relevant.

Grenzen der Wahrnehmung

Ein Geräusch ermöglicht neben der Interpretation seiner Ursache auch die Lokalisation seiner Quelle. Schon eine Zeitabweichung von einigen Millisekunden zwischen dem Auftreffen der Schallwellen auf dem linken bzw. rechten Trommelfell genügt, um eine Richtungseinschätzung der Schallquelle zu ermöglichen. Die Lokalisation gelingt auf akustisch reflexionsfreien Flächen besser als z.B. in engen reflexionsreichen Gassen. Sie ist bei Geräuschen mittlerer Frequenz am besten und nimmt bei sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen ab [92]. Dies ist bei der Anordnung der Schallquellen im Fahrsimulator zu beachten.

Abbildung 2-6: Hörfläche mit Hörschwelle und Schmerzgrenze als begrenzenden Linien. [92]



Während die Richtungseinschätzung sehr gut gelingt, ist Abschätzung der Entfernung einer Schallquelle lediglich bis ca. 1m mit einiger Genauigkeit möglich, sofern es sich nicht um einen Dauerton, sondern um ein diskontinuierliches Geräusch handelt. Es können vier Gruppen von Geräuschen bei der Fahrt unterschieden werden [44]:

- *Indifferente Geräusche* und Töne sind in Qualität und Pegel zu unauffällig, um Beachtung zu finden (z.B. leises Quietschen oder Knarren des Fahrzeugs).
- *Einschläfernde Geräusche* und Töne mit geringem bis mittlerem Pegel und gleichmäßigem bzw. regelmäßig intermittierendem Auftreten, wie das Reifengeräusch oder Motorengeräusche bei niedriger Last.
- *Erschreckende Geräusche* und Töne mit hohem Pegel und plötzlichem, unerwartetem Auftreten wie Hupe oder Reifenplatzer. Sie bewirken ein reflexbedingtes Zusammenzucken und sind ggf. Ursache für das Verreißen des Lenkrads oder plötzliches Bremsen.
- *Signale und Störgeräusche* sind Geräusche und Töne, die die normale Aufmerksamkeits-einstellung des Fahrers auf die Geräuschursache und damit von der Fahraufgabe ablenken. Dies können gewollte Signale der Mensch-Maschine-Schnittstelle des Fahrzeugs oder Störgeräusche wie das Klappern von Fahrwerksteilen sein.

Die akustisch dargebotene Informationsmenge im Fahrzeug deckt einen sehr großen Bereich des Frequenzspektrums ab. Dieses beginnt bei niederfrequenten Schwingungen z.B. durch Radunwuchten (ca. 20Hz) und endet mit dem hochfrequenten Geräusch einer quietschenden Bremsscheibe (bis 20kHz) oder eines blockierten Reifens.

2.2.3 Gleichgewichtssinn

Der Gleichgewichtssinn ermöglicht die Wahrnehmung von Lageveränderungen des Körpers durch Macula- und Vestibularorgan. Diese Organe im Innenohr können translatorische bzw. rotatorische Beschleunigungen sensieren. Die physiologische Schwelle für die Reizauslösung bei rotatorischen Beschleunigungen liegt bei $1^\circ/s^2$. Translatorische Beschleunigungen können ab einem Wert von $0,1-0,2m/s^2$ wahrgenommen werden. Die Wahrnehmungsschwelle des Menschen ist neben der absoluten Höhe des Reizes auch abhängig von der Einwirkdauer. Tabelle 2-1 bietet einen Überblick über die in der Literatur angegebenen Merkschwellen und stellt die bei der Normalfahrt auftretenden Bewegungsgrößen gegenüber. [22, 86, 92, 98]

Größe	Translatorische Beschleunigungen [m/s^2]	Giergeschwindigkeit [$^\circ/s$] (Wahrnehmung optisch)	Rotatorische Beschleunigungen [$^\circ/s^2$]
Merkschwelle	0,18	5-12 (1,5*)	meist 4 (2-6)
Messwerte Normalfahrt			
Autobahn	2,5	3,5	1,8
Bundesstraße	1,8	4	2,5
Landstraße	4,8	10	3,8

Größe	Translatorische Beschleunigungen [m/s^2]	Giergeschwindigkeit [$^\circ/s$] (Wahrnehmung optisch)	Rotatorische Beschleunigungen [$^\circ/s^2$]
kurvige Nebenstraße	4,5	17	4,5

Tabelle 2-1: Merkschwellen fahrdynamischer Größen und Werte aus der Realfahrt [98]

*) Einwirkdauer 1 Sekunde: Merkschwelle: $5^\circ/s^2$, ab ca. vier Sekunden Einwirkdauer: $1,5^\circ/s^2$

2.2.4 Hautsinne

Die haptischen Sinne oder Hautsinne liefern durch die so genannte Oberflächenwahrnehmung exterozeptive, also die Umwelt betreffende Informationen und durch die Tiefenwahrnehmung sog. propriozeptive Informationen über Befindlichkeit und Lage des Körpers. So ermöglichen sie z.B. Rückschlüsse über das Drehmoment am Lenkrad und andere Bedienkräfte, aber auch über die Fahrzeugbeschleunigungen durch Druckreizungen der Haut. Für die Auslegung einer Fahrsimulation ist es hilfreich, folgende Hautsinne zu unterscheiden [4, 16, 44, 92].

Taktile Wahrnehmungen sind Sinneseindrücke, welche über die Deformation der Hautoberfläche insbesondere an Händen und Füßen entstehen. Dabei werden unterschiedliche Rezeptoren angesprochen, welche die Wahrnehmung von Berührung, Druck und Schwingungen ermöglichen, wie sie an Lenkrad, Pedalen und Schaltern auftreten. Der haptische Eindruck gibt Aufschluss über Position und Lage der Gliedmaßen und durch den Kontakt zu den Bedienelementen Informationen über den Fahr- und Fahrzeugzustand.

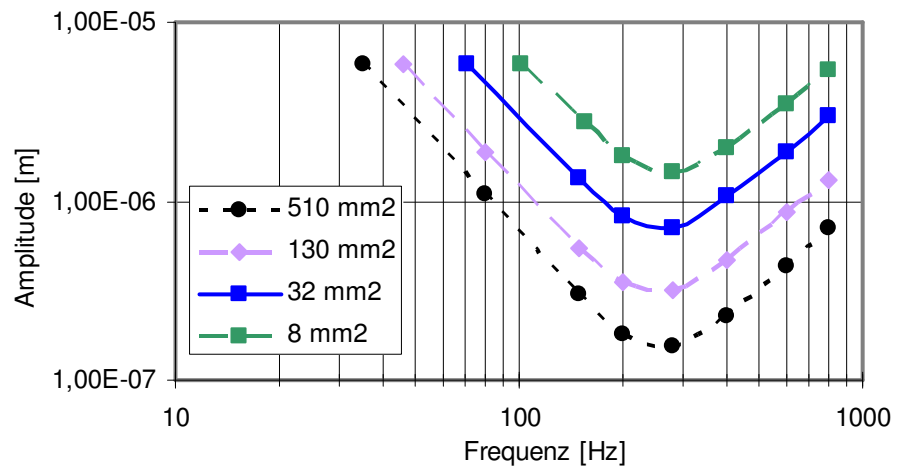
Mittels des Kraftsinns wird der für eine Aufgabe notwendige Kraftaufwand erspürt und angepasst. Die Anpassung geschieht reflexartig und sehr schnell, wenn nicht bewusst gegengesteuert wird. (Beispiel: Kraftanpassung beim Kauen). Das Auflösungsvermögen des Kraftsinns ist mit dem Faktor 0,02 sehr hoch. Eine Kraftänderung von zwei Hundertstel der Haltekraft kann demnach noch wahrgenommen werden, was bei der Spezifikation der Lenkkraftsimulation zu berücksichtigen ist.

Bei der Schwingungswahrnehmung werden über die Hautoberfläche Vibrationen wahrgenommen. Während dauernd auftretende, annähernd harmonische Schwingungen in Folge der Reizgewöhnung meist nicht mehr beachtet werden, führen außergewöhnliche Schwingungen hinsichtlich Amplitude, Frequenz oder Diskontinuität zu erhöhter Aufmerksamkeit und bei geübten Fahrern ggf. zu fertigkeitbasierten Reaktionen. Ein erfahrener Fahrer wird reflexartig die Geschwindigkeit reduzieren, wenn er am Lenkrad die über den Reifenlatsch induzierten Schwingungen bei Überschreiten der Haftgrenze bei zu schneller Kurvenfahrt wahrnimmt.

Die Wahrnehmungsfähigkeit dieses Sinnes ist von der Größe der Haut-Kontaktfläche abhängig und besonders an den Händen sehr hoch. Dort sind die so genannten „Pacinischen Korpuskeln“ für die Schwingungswahrnehmung ab 40Hz verantwortlich. Deren Empfindlichkeit ist bei 250Hz am höchsten (Abbildung 2–7). Vibrationen unter 40 Hz werden nicht durch diese Rezeptoren, sondern durch die Schwingung der ganzen Hand selbst wahrgenommen, deren Eigenfrequenz bei ca. 30-50Hz liegt [42]. Die Empfindlichkeit für Schwingungen nimmt erst oberhalb

von 1000Hz deutlich ab. Diese Wahrnehmungsgrenzen sind für die Spezifikation der Lenkkräftsimulation hilfreich.

Abbildung 2-7: Schwellenwerte vibrotakter Wahrnehmung am Handballen in Abhängigkeit von der Frequenz, Kontaktfläche als Parameter [42]



Epikritische Wahrnehmungen sind wie die taktilen Informationen Sinneseindrücke der Haut, die über sog. „Tangorezeptoren“ in der Gesäßregion bzw. am Körperrumpf die Ableitung von Information über Beschleunigungen in Längs- oder Querrichtung sowie Vibrationen ermöglichen. Ändert sich der Reiz längere Zeit nicht, tritt eine Reizgewöhnung auf, sodass die Deformation nicht mehr wahrgenommen wird. Erst bei erneuter Deformation ergibt sich ein neuer Reiz. Dieser Wahrnehmungskanal kann zur Unterstützung der Beschleunigungssimulation angesprochen, indem z.B. Verformungselemente in den Sitz eingebracht werden.

- Die kinästhetische Wahrnehmung, auch Tiefensensibilität oder Propriozeption (Eigenwahrnehmung) genannt, ermöglicht eine Bewegungsempfindung und das Erkennen der Bewegungsrichtung des Körpers und der Gliedmaßen. Stellungsrezeptoren in den Gelenken, Längenrezeptoren in den Muskelspindeln und Sehnenrezeptoren liefern Information über die Stellung der Gliedmaßen. In der Fahrsimulation wird diese Wahrnehmungsart relevant, wenn die Technologien der Neigungs- und der Fliehkräftsimulation verwendet werden.
- Mit Viszerozeption wird die Wahrnehmung der eigenen Organe bezeichnet. Bei Darstellung von Schwingungen durch das Bewegungssystem können die Eigenfrequenzen der inneren Organe angesprochen werden, was zu Resonanzen und schließlich zur sog. „Kinetose“ also dem Unwohlsein aufgrund der Bewegungssimulation, beitragen kann. Dieser Umstand kann durch Abstimmungsmaßnahmen berücksichtigt werden und hat keinen Einfluss auf das Anlagenkonzept.

Dieser Beschreibung der Sinneskanäle wird im nächsten Kapitel gegenübergestellt, wie die Simulatortechnik in der Lage ist, diese durch Beschleunigungen und Kräfte sowie optische und akustische Reize zu bedienen.

3 Stand der Technik – Anwendung und Technologie der Fahrsimulation

Das Kapitel zeigt die Anwendung der Fahrsimulation und den Stand der Simulatortechnik auf. Die Informationen zur Simulatortechnik basieren auf der Auswertung der Literatur und den Erfahrungen aus dem Aufbau des FTM-Simulators. Diese Kombination ermöglicht die praxisnahe Beurteilung bestimmter Konzeptmerkmale und Merkmalskombinationen. Vor allem bei der Konzipierung der Sicht- und Bewegungssysteme können auf diese Weise unvorteilhafte Merkmalskombinationen vermieden werden.

Wie gut die Simulatortechnik aufgrund empirischer Erkenntnisse in der Lage ist, die Anforderungen einer Anwendung zu erfüllen, wird durch den Begriff der Validität beschrieben. Der Beschreibung der Simulatortechnik ist daher der Kenntnisstand zur Validität von Simulatorversuchen vorangestellt. Dabei werden die Ursachen für die Schwierigkeiten sichtbar, einen Zusammenhang zwischen Simulatortechnik und Fahrerverhalten bzw. Anwendung herzustellen.

Validität von Simulatorversuchen

In der Literatur werden die Begriffe der absoluten und der relativen Validität verwendet, um die Güte von Simulationsergebnissen zu beschreiben. Absolute Validität bedeutet die qualitative und quantitative Übereinstimmung der zur Beschreibung des Fahrerverhaltens herangezogenen Parameter und erfordert entweder die unverfälschte Darstellung aller Sinneswahrnehmungen oder den Nachweis, dass ein fehlender oder unzureichender Reiz keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Es muss dann nachgewiesen werden, dass der Fahrer die Unvollständigkeit der Fahrumgebung, Verzögerungen und Verzerrungen in der Darstellung sowie das Handeln in zwei parallelen Welten kompensieren kann.

Für die Erfüllung der primären Fahraufgabe, also die Geschwindigkeitswahl und die Spurhaltung, konnte absolute Validität in den betrachteten Quellen nicht allgemein nachgewiesen werden [9, 17]. Hingegen wird bei einigen Aspekten von sekundären und tertiären Aufgaben eine sehr gute Übereinstimmung gefunden (s. Kapitel 5.1.3 und 5.1.4). Generell kann aber auch hier nicht von absoluter Validität gesprochen werden, da das Spektrum möglicher Anwendungen zu groß ist, um eine einheitliche Aussage treffen zu können. Keine der betrachteten Quellen findet absolute Validität von Ergebnissen aus Simulatorversuchen.

Von relativer Validität spricht man, wenn Leistungsveränderungen des Fahrers als Folge der Variation experimenteller Bedingungen die gleiche Tendenz aufweisen wie in der Realität. Die Literatur zur Validität in der Fahrsimulation ist von Studien geprägt, in der nach einem formel-

mäßigen Zusammenhang bezüglich der Übereinstimmung zwischen Daten aus der Realfahrt und der Simulation gesucht wird. Insgesamt gestaltet sich die Befundlage hinsichtlich des Grads und sogar des Vorzeichens dieser Zusammenhänge uneinheitlich. Die relative Validität der Simulation wird im Allgemeinen trotzdem als gegeben angesehen, da keine der Studien in Zweifel zieht, dass die für die Fahraufgabe angewandten Strategien in Simulator und Realverkehr vergleichbar sind. Unter dieser Voraussetzung eignet sich die Fahrsimulation in besonderer Weise für vergleichende Studien, wie sie in Forschung und Entwicklung üblich sind. Ein Faktor kann unter Konstanthaltung der übrigen systematisch variiert werden, sodass relative Veränderungen im Fahrerverhalten eindeutig auf die vorgenommene Variation zurückgeführt werden können. [4, 17]

Für relative Validität ist nicht zwangsläufig die Übereinstimmung der physikalischen Simulationsparameter mit der Realität erforderlich. Bei geeignetem Versuchsdesign können auch mit einfachen Fahrsimulatoren und stark abstrahierten Fahraufgaben Ergebnisse erzeugt werden, die den Kriterien der relativen Validität genügen [39]. Ob die relative Validität in einem für die Anwendung ausreichenden Maß gegeben ist, hängt davon ab, ob der Proband die Simulatorfahrt als die Regelaufgabe „Führen eines Fahrzeugs“ erkennt und akzeptiert. Diese Gegebenheit wird in der Literatur durch die Begriffe Immersion und Präsenzepfinden beschrieben [17]. Die Immersion ist die technische Beschreibung, wie gut der Simulator die Sinne des Probanden mit Reizen bedienen kann, welche das gewünschte Verhalten hervorrufen. Sie kann als Maß für die physikalische Übereinstimmung der Simulationsgrößen mit der Realität gesehen werden. Das Präsenzepfinden beschreibt dagegen den Grad des sich Einlassens auf die virtuelle Umgebung, also eine personenabhängige Größe, die nur teilweise durch die Technik des Simulators beeinflusst werden kann [3, 17, 31, 35, 65]. Eine Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen Fahrerverhalten und einzelnen technischen Merkmalen der Fahrsimulation ist bislang noch nicht so gelungen, dass ein Transfer auf andere Versuchsreihen, andere Simulatoren oder gar in die Realität möglich wäre. Dafür gibt es vor allem drei Gründe:

- Abweichungen zwischen Realfahrt und Simulatorfahrt: Es gelingt in den Studien meist nicht, die mit dem Realfahrzeug befahrene Strecke im Simulator identisch zu reproduzieren (Abbildung 3-1). Vielfach unterscheiden sich auch die zur Messung verwendeten Fahrzeuge hinsichtlich Motorisierung, Größe und der erzeugten Geräuschkulisse vom in der Simulation verwendeten Fahrzeugmodell.
- Komplexität: Die Steuer- und Regelvorgänge bei der Fahrt werden vom komplexen Zusammenspiel aller Sinneseindrücke bestimmt. Wenn also Quervergleiche zwischen Versuchsreihen auf verschiedenen Simulatoren angestellt werden, um ein Parameterfeld für die Abhängigkeit des Fahrerhaltens von der Simulatortechnik aufzuspannen, darf nur ein einzelner Parameter variiert werden. Alle anderen Simulationsgrößen müssen konstant gehalten werden, was bei unterschiedlichen Simulatoren nicht gegeben ist. Auch baugleiche Simulatoren können durch ihre Abstimmung unterschiedliche Reaktionen hervorrufen [28].

- Nicht aufgabenbezogene, personenabhängige Reaktionen: Die Validierung eines Messgeräts (Prüfstand) hinsichtlich seiner Abbildungsgenauigkeit wird in der Messtechnik nur dann als zielführend gesehen, wenn alle Glieder der Messkette in der Lage sind, reproduzierbar die erforderliche Genauigkeit zu erbringen. Genau das ist aber bei einem Fahrsimulator nicht der Fall, da der Mensch als Regler Schwankungen in einer Größenordnung in die Messkette bringt, die weit über der Größenordnung der zu messenden Größe liegen können. Parameter für diese Varianz sind Lerneffekte, Erfahrung, Erwartungshaltung und die Tagesform. Eine solche Messung ist im wissenschaftlichen Sinn nicht reproduzierbar. Die in Kapitel 4 entwickelte Methode berücksichtigt diese Randbedingung, indem nur physikalisch oder physiologisch nachvollziehbare Zusammenhänge eingehen.



Abbildung 3-1: Unterschiedliche Randbedingungen in Realität und Simulation bei Versuchen zur Validierung des Fahrerhaltens [9]

Nachdem der grundlegende Begriff der Validität erläutert wurde, werden in den nächsten Kapiteln die Anwendung und die Technik der Fahrsimulation beschreiben.

3.1 Anwendung der Fahrsimulation

Um einen Überblick über die Anwendungen der Fahrsimulation zu gewinnen, wurde der Untersuchungsgegenstand von mehr als 550 Einzelveröffentlichungen aus dem Bereich der Fahrsimulation ermittelt. Etwa die Hälfte dieser Dokumente hat die Weiterentwicklung der Simulator-technik zum Inhalt und ist nicht als eigentliche Anwendung zu sehen. Bei der zweiten Hälfte der Veröffentlichungen steht das System Fahrer-Fahrzeug-Umwelt im Mittelpunkt der Untersuchungen. Dabei stellen Themen aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung (F&E) den größten Anteil, während aus dem Bereich der Ausbildung (Fähigkeitserwerb) nur wenige Berichte stammen. Bei den F&E Themen kann weiter zwischen Untersuchungen zur Fahrzeugentwicklung, zur Verkehrstechnik und zum Fahrerverhalten unterschieden werden (Abbildung 3-2).

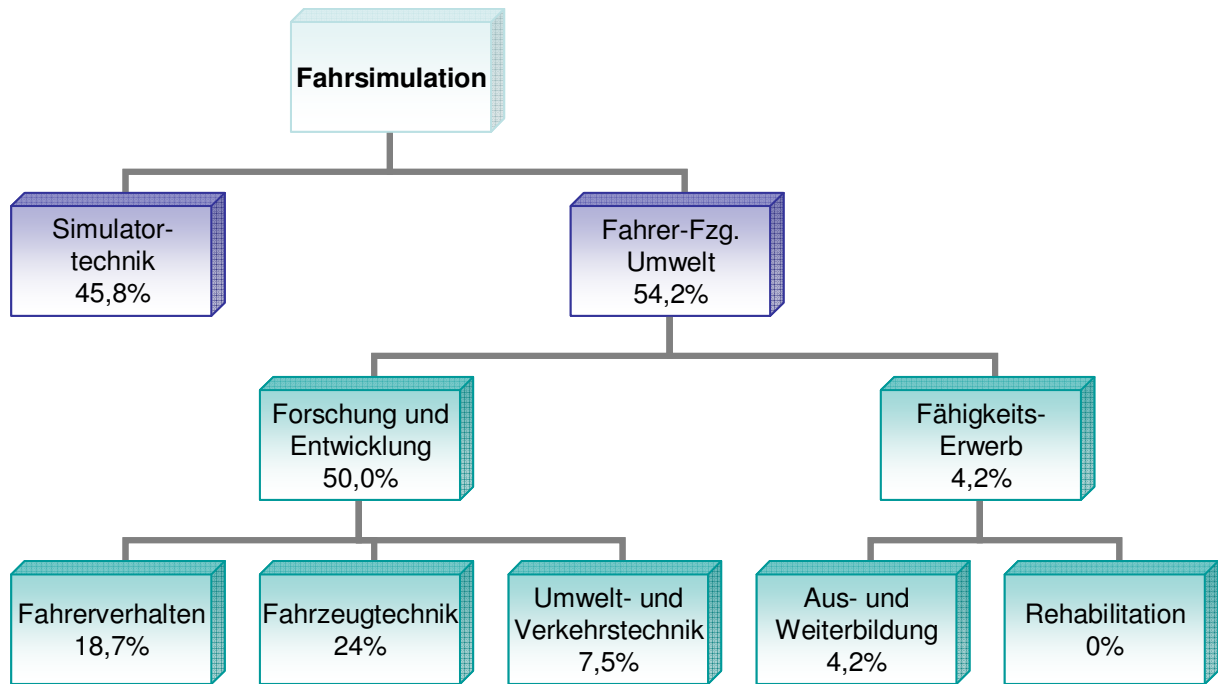


Abbildung 3-2: Übersicht und Häufigkeitsverteilung von Veröffentlichungen aus dem Bereich Fahrsimulation (Datenbasis: 550 Einzelveröffentlichungen, Prozentangaben absolut)

3.1.1 Fähigkeitserwerb

Nur ein geringer Anteil der Dokumente befasst sich mit der Verwendung von Fahrsimulatoren für Aus- und Weiterbildung, wo die Zahl der Veröffentlichungen naturgemäß geringer als im Bereich von Forschung und Entwicklung ist. Dabei geht es um die Vermittlung neuer oder die Auffrischung bestehender Fertigkeiten. Das Spektrum reicht von der einfachen Schulung der Fahrzeugbedienung über Rehabilitationsmaßnahmen bis hin zur Simulation risikoreicher Einsatzfahrten (Abbildung 3-3).



Abbildung 3-3: Fähigkeitserwerb – PKW-Fahrausbildung auf statischem Fahrsimulator und militärische Gefechtssimulation (Kraus-Maffei-Wegmann)

Der Simulator wird vor allem dann als Trainingsgerät verwendet, wenn das simulierte Fahrzeug teuer in der Anschaffung bzw. im Betrieb ist (Flugzeuge, Schiffe), oder, wenn die Vorteile der Simulation unabdingbar sind (Risikosituationen, Gefahrstoffe, Witterungsbedingungen).

3.1.2 Fahrerverhalten

Untersuchungen zum Fahrerverhalten unter psychologischen und physiologischen Gesichtspunkten sind weit verbreitet. Es handelt es sich dabei oftmals um Grundlagenuntersuchungen, bei denen die Leistungsfähigkeit des Reglers Mensch unter verschiedenen Randbedingungen getestet werden soll. Typische Anwendungen sind:

- Einfluss von Alkohol, Drogen
- Einfluss von Medikamenten
- Alterseffekte
- medizinische Zustände
- Aufmerksamkeit, Ermüdungseffekte
- Gefühlszustand
- mentale Belastung
- Persönliche Eigenschaften
- Charaktereigenschaften
- Physische und geistige Behinderungen

Da die Fahraufgabe nicht im Vordergrund der Untersuchungen steht und die durch die Simulatortechnik in den Versuch eingebrachte Streuung (Verträglichkeit, Fahrerfahrung) so gering wie möglich sein muss, kann es vorteilhaft sein, diese Untersuchungen mit einfachen Simulatoren oder Nachführaufgaben durchzuführen [4, 102].

3.1.3 Umwelt- und Verkehrstechnik

Die Methode „Fahrsimulation“ findet in einer virtuellen Umwelt statt und bietet daher einzigartige Möglichkeiten, verkehrstechnische Randbedingungen zu variieren [62]. Innovative Verkehrs-Infrastrukturen können so einer Beurteilung im Fahrversuch zugänglich gemacht werden. Typische Anwendungen sind:

- Straßen und Fahrbahnrandgestaltung
- Eigenschaften des Straßenbelags (Rauheit, Unebenheiten, Strukturen, Farbe)
- Verkehrszeichen und Verkehrssignale (passiv, aktiv, interaktiv)
- Straßenbeleuchtung und Sichtverhältnisse, Sichtbarkeit
- Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern

3.1.4 Fahrzeugtechnik

Die Fahrsimulation wird in der Fahrzeugtechnik genutzt, um neu entwickelte Systeme einer Beurteilung durch den Fahrer zugänglich zu machen. Es ist kennzeichnend für den Einsatz eines Fahrsimulators in der Fahrzeugentwicklung, dass das System den Test im geschlossenen Regelkreis erfordert. Dabei kann entweder die Funktion der Systeme oder deren Schnittstelle zum Menschen beurteilt werden. Denkbare Anwendungen aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik sind:

- Design
- Fahrdynamik, Fahrleistung
- Fahrkomfort
- Ergonomie
- Innenraumgestaltung
- Fahrsicherheit, Regelsysteme
- Fahrerassistenzsysteme
- Mensch-Maschine Schnittstelle

Die o.g. Veröffentlichungen aus dem Bereich der Fahrzeugentwicklung (24% von 550 Einzelquellen) verteilen sich auf mehrere Gebiete. Zu den Themen Fahrleistung und Design (je <1%) liegen fast keine Veröffentlichungen vor. Nur etwa 10% beschäftigen sich mit dem Fahrverhalten. In ca. 5% der Berichte werden diverse Themen der Fahrzeugentwicklung behandelt, die keinem der herkömmlichen Entwicklungsumfänge zugeordnet werden können. Der Großteil der betrachteten Untersuchungen befasst sich mit Themen aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle (48,5%) und der Fahrerassistenzsysteme (36,4%). Die Verteilung spiegelt die besondere Eignung des Fahrsimulators für diese Entwicklungsumfänge wider.

3.2 Technik der Fahrsimulation

Die in der Literatur verfügbaren Erkenntnisse über die verschiedenen Subsysteme eines Simulators und deren Beitrag zur Simulationsgüte sind in den nächsten Kapiteln zusammengefasst.

Aus den Veröffentlichungen zu bereits existierenden Entwicklungssimulatoren kann man einen Überblick über mögliche Gesamtkonzepte gewinnen [6, 8, 57, 78, 91, 99]. Fahrsimulatoren setzen sich aus folgenden Subsystemen zusammen:

- Sichtsimulation
- Bewegungssimulation
- Geräuschsimulation
- Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle
- Datenbasis
- Verkehrssimulation

Mit Hilfe der Erkenntnisse über die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit und der Fahrzeugführung, werden diejenigen Ausbaustufen der Subsysteme erarbeitet, die eine signifikante Verbesserung der Simulation erbringen.

3.2.1 *Sichtsimulation*

Durch die Sichtsimulation wird der größte Teil der für den Fahrvorgang erforderlichen Eingangsdaten erzeugt. Ausgeführte Sichtsysteme sind in [6, 8, 57, 78, 91, 99] beschrieben. Aufbauend auf diesen Beschreibungen werden in den folgenden Kapiteln die Leistungsmerkmale einer Sichtsimulation aufgezeigt und wichtige Ausführungsstufen erläutert.

3.2.1.1 *Abstand vom Fahrerauge*

Für den geometrischen Entwurf der Sichtsimulation ist der Abstand des Bildmediums vom Auge des Fahrers, dem sog. Augabstand von Bedeutung, weil dadurch die Außenabmessungen

des Simulators festgelegt werden. Funktional gesehen ist dieser Parameter für die Akkomodation des Auges während des Fahrvorgangs verantwortlich. Die Anzeigeelemente eines Fahrzeugs sind im Bereich von ca. 0,4m bis 0,8m vom Fahrerraum entfernt, was bei manchen Menschen im Bereich des Nahpunktes liegen kann. Für die Fahrt im Realfahrzeug ist beim Blickwechsel zwischen Anzeigen und Umwelt das fortwährende Durchlaufen der gesamten Akkomodationsstrecke kennzeichnend. Wenn das Bildmedium in der gleichen Entfernung liegt wie die Anzeigen des Fahrzeugs, ist die Akkomodation zwischen Fahrzeuginnenraum und Sichtsystem nicht erforderlich, was sich negativ auf die Immersion auswirkt. Physiologisch gesehen ist ein Augabstand von maximal 5m sinnvoll, die Akkomodationsstrecke wird jedoch bereits bei einem Abstand von 2,5-3 m zu etwa 95% durchlaufen [30].

3.2.1.2 Horizontaler und vertikaler Sichtbereich

Wenn der Proband im Simulator Bereiche sieht, die nicht von der Sichtsimitation abgedeckt sind, hat das negative Auswirkungen auf das Präsenzempfinden. Zudem kann die Wahrnehmung verschiedener, parallel als real erlebter Umgebungen das zustande Kommen der Simulatorkrankheit begünstigen. Für eine hochwertige Fahrsimulation ist also die Abdeckung des gesamten Frontsichtbereichs wünschenswert [37, 63]. Neben Kostenaspekten gibt es aber mehrere funktionale Gründe, auf eine aufwändige 360°-Rundumsicht zu verzichten:

- *Indirekte Sicht:* Die rückwärtige Sicht ist bei vielen Fahrzeugen teilweise oder ganz durch die Karosserie verdeckt und für den Fahrvorgang von untergeordneter Bedeutung. Zudem erfolgt der Blick in den rückwärtigen Raum auch im Realfahrzeug selten direkt, sondern über eingebettete Teilansichten, wie z.B. die Rückspiegel.
- *Anwendungsgerechtigkeit:* Wenn die Anwendung weder einen hohen Grad an Präsenzempfinden noch einen großen horizontalen Bildausschnitt zur Darstellung der Fahraufgabe erfordert, kann auf die Rundumsicht verzichtet werden. Für bestimmte Anwendungen mit langsamen Geschwindigkeiten und großen Kurvenradien wird zudem ein ausreichender Grad an Immersion schon mit einem horizontalen Bildbereich von 60° erreicht.
- *Zugänglichkeit:* Die Zugänglichkeit zum Fahrzeug-Mockup ist bei einem 360° Sichtsystem erheblich eingeschränkt.

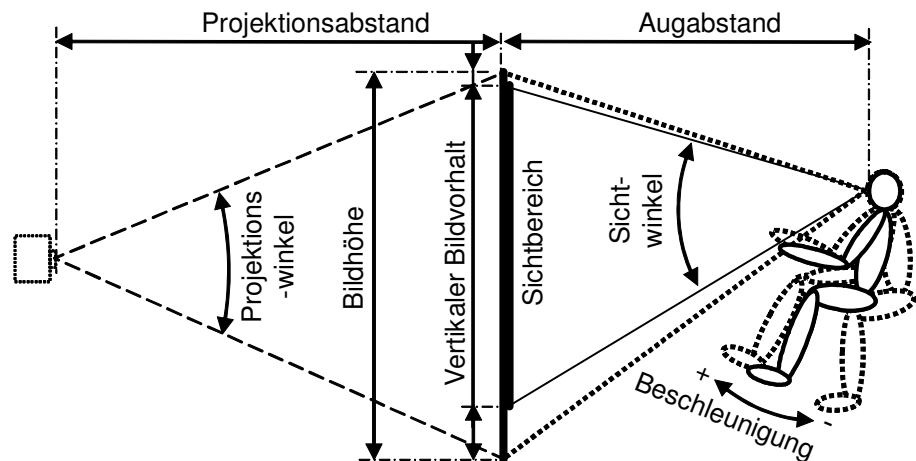
Auslegung des Sichtbereichs

In der Regel wird bei der Auslegung der Sichtsimitation zunächst der horizontale Sichtbereich festgelegt. Ausgehend davon sind dann der vertikale Sichtbereich und der Abstand des Bildmediums vom Fahrerraum ausschlag gebend für die Bildhöhe und damit die gesamte Bildgröße. Der vertikale Blickwinkel ist zwischen der Hauptblickrichtung (40-60°) und dem Blick aus dem Seitenfenster, wo er bis zu 170° betragen kann, stark unterschiedlich. Bei einem großen Augabstand ergeben sich damit schnell Bildhöhen, die mit existierenden Bildmedien praktisch nicht abgedeckt werden können. Die Verringerung des Augabstandes löst das Problem des vertikalen Sichtbereichs, bringt aber Nachteile hinsichtlich der Akkomodation des Auges mit sich.

Bei den meisten Simulatoren wird daher primär der Blick durch die Frontscheibe des Realfahrzeugs als Ausschlag gebend für den erforderlichen vertikalen Sichtbereich erachtet.

Wird das Bildmedium nicht mitbewegt (Fixed-Screen), so muss Bildhöhe vorgehalten werden, um die Sichtfeldvergrößerung durch Nickbewegungen des Fahrstandes abzubilden (Abbildung 3-4). Die Festlegung der Vorhaltebereiche ist abhängig von den durch die Bewegungssimulation erzeugten Nickwinkeln. Der maßgebliche Fall bei der Auslegung dieser Vorhaltebereiche ist die Nickbewegung beim Bremsen, da die Verzögerungen meist höher sind als die erreichbaren Beschleunigungen. Der Vorhalt nach oben kann also geringer ausfallen als nach unten. Nach subjektiven Aussagen von Probanden im FTM-Simulator wird es nicht als sehr störend empfunden, wenn bei starken Bremsungen die untere Bildbegrenzung sichtbar wird [200]. Es scheint also nicht erforderlich, den gesamten theoretischen Sichtbereich abzubilden, wenn die Vergrößerung der Bildfläche große Nachteile hinsichtlich Auflösung und Helligkeit mit sich bringt.

Abbildung 3-4: Auslegung des vertikalen Sichtbereichs für eine Rückprojektion bei Anwendung der Neigungssimulation



Aus der erforderlichen Bildhöhe und dem horizontalen Sichtbereich ergibt sich eine rechteckige Fläche, die von der Projektion abgedeckt werden muss. Dabei ist ggf. ein Überlappungsbereich für das Edge-Blending, also das Verschleifen der Bildübergänge, von ca. 10% der Bildbreite zu berücksichtigen. Die erforderliche Helligkeit und Auflösung des Bildes bestimmen dann zusammen mit dieser Fläche die Anzahl und die Spezifikation der Projektoren.

Head-Mounted Display

Als Head-Mounted Display (HMD) wird eine Vorrichtung bezeichnet, die in Form eines Helms oder einer Brille auf dem Kopf des Fahrers platziert wird. Die Vorrichtung beinhaltet ein Bildmedium, welches das gesamte Gesichtsfeld des Fahrers abdeckt. Es bietet die Möglichkeit, Umgebung, Fahrzeug und Fahrer in einer gemeinsamen virtuellen Repräsentation darzustellen. Durch die konzeptbedingte Trennung der Bilder für linkes und rechtes Auge kann Stereosehen ohne aufwändige Maßnahmen zur Kanaltrennung realisiert werden. Das Konzept bietet mit geringstem Konstruktionsaufwand die Möglichkeit, den gesamten Sichtbereich abzudecken. Dafür

ist ein erhöhter Modellierungsaufwand für den Fahrzeuginnenraum und ggf. die Erzeugung einer virtuellen Entsprechung des Fahrers, eines sog. Avatars, erforderlich. Zwingender Bestandteil dieser Technologie ist das sog. Head-Tracking, welches die Kopfbewegungen des Fahrers in Änderungen des Bildausschnitts abbildet. Soll der Fahrer mit dem virtuellen Fahrzeug in Interaktion treten, müssen auch dessen Hände mit Tracking-Elementen (z.B. Data-Gloves, Abbildung 3-5) ausgestattet sein, um in der virtuellen Welt positioniert und visualisiert werden zu können. [23, 55]

Die Technologie ermöglicht die Interaktion mit einem auf CAD-Daten basierenden virtuellen Prototyp des Cockpits ohne aufwändige Hardwarefertigung. Die Beurteilung umfasst v.a. optische und teilweise ergonomische Gesichtspunkte, kann aber bei entsprechender Nachbildung der Bedienhardware auch die Interaktion mit dem virtuellen Prototyp mittels Data-Glove und Motion-Tracker beinhalten. [55]

Trotz der vollständigen Abdeckung des Gesichtsfelds wird durch diese Lösung das Präsenzepfinden des Probanden durch die erforderliche Ausstattung mit Messtechnik an den Händen und am Kopf beeinträchtigt. Zudem erfolgen Bedienvorgänge im Fahrzeug in vielen Fällen



Abbildung 3-5: Head-Mounted Display und Data-Glove

durch Auflegen der Hand zur Abstützung oder in einem Zug mit dem Festhalten am Bedienelement. Daher ist es für den Probanden ungewohnt und schwierig, Bedienvorgänge ohne haptisches Feedback auszuführen. Obwohl die Schlüsseltechnologien für die Positionierung des Avatars und dessen Interaktion mit dem virtuellen Fahrzeug vorhanden sind, kann eine Genauigkeit, welche die exakte Bedienung von Tasten oder von Bedienelementen mit mehreren Freiheitsgraden und kleinen Bedienwegen nicht als Stand der

Technik angesehen werden. Die virtuelle Umgebung kann daher zwar für Erreichbarkeitsaufgaben verwendet werden, ist aber für Aufgaben, welche das Anfassen von Bedienelementen erfordern, nicht gut geeignet. [23, 55]

Das HMD ist als Sonderform von Sichtsystemen für Fahrsimulatoren zu sehen, welche besonders für die Visualisierung und die abstrahierte Interaktion mit dem Fahrzeug, im Sinne eines Konzeptentscheids, in der Forschungs- und Vorentwicklungsphase geeignet ist.

3.2.1.3 Stereosehen

Um das Stereosehen und somit die Tiefenwahrnehmung durch simultane Parallaxe zu ermöglichen, müssen so genannte Halbbilder für linkes und rechtes Auge separat berechnet und dargestellt werden (Kanaltrennung). Das gebräuchlichste Verfahren für die Kanaltrennung ist die Polarisationsfiltertechnik, welches auch Passivstereo genannt wird. Daneben existieren die als Aktivstereo bezeichneten Zeit-Multiplex- und Wellenlängen-Multiplexverfahren.

Bei allen Verfahren muss der Proband eine aktive oder passive Brille tragen, welche für die Filterung der Halbbilder aus der Projektion erforderlich ist. Das Zeitmultiplexverfahren benötigt eine relativ schwere, aktive Shutterbrille. Das 1999 entwickelte Wellenlängen-Multiplex-Verfahren erzeugt die Halbbilder, indem das Farbbild aus monochromatischen Grundfarben mit für linkes und rechtes Auge unterschiedlichen Wellenlängen erzeugt wird. Die dafür erforderliche Brille unterscheidet sich äußerlich nicht von herkömmlichen Sehhilfen und bedeutet daher nur eine geringe Beeinträchtigung des Präsenzepfindens. Für den Entscheid über den Einsatz dieser Technologien sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden [210, 215].

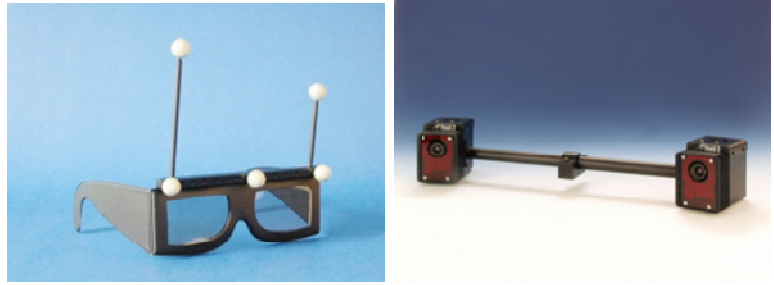
- Der Stereoeffekt ist in der Realfahrt von stark untergeordneter Bedeutung, da er nur bis zu einem Abstand von etwa 5 Metern für die Tiefenwahrnehmung relevant ist.
- Das Stereobild ist auf eine bestimmte Lage und Position des Augenpaares ausgerichtet. Es ist also zwingend Head-Tracking vorzusehen, da sonst ein unrealistischer Eindruck bei der Drehung oder Schiefstellung des Kopfes entsteht.
- Die gebräuchlichen Verfahren zum Edge-Blending können nicht übernommen werden. Bekannte Systeme arbeiten ohne Edge-Blending mit stumpf aneinander gefügten Bildabschnitten. Die Durchgängigkeit der Projektion wird verschlechtert.
- Je nach Projektionsverfahren ist mit erheblich höheren Kosten für Hardware und mit einer komplizierteren Konstruktion zu rechnen.

Es sind keine großen Entwicklungssimulatoren mit Stereosichtsystemen bekannt.

3.2.1.4 Head-Tracking

Stand der Technik sind Sichtsysteme, deren Bilddarstellung auf eine fest im Raum positionierte Augenposition, der sog. Design-Eye-Point-Position (DEPP) ausgelegt sind. Entgegen der Erfahrungen in der Realfahrt ergeben deswegen Bewegungen des Fahrers in einem Fahrsimulator ohne Head-Tracking keinen zusätzlichen Informationsgewinn durch Bewegungsparallaxe. Das Bild bleibt für den Fahrer in jeder Sichtposition dasselbe. Hier versagen Prozesse, die der Mensch anwendet, um Abstandsinformation über Objekte im nahen und mittleren Entfernungsbereich zu gewinnen. [17]

Abbildung 3-6: Head-Tracking mittels Brille und Infrarotkameras [99980]



Eine Lösung für dieses Problem stellt die Implementierung einer Komponente dar, welche die Bewegungen des Fahrerkopfes erfasst und in der Berechnung des sichtbaren Bildausschnittes berücksichtigt. Dieses Merkmal ist für die Frontsicht, aber auch für die Berechnung des Bildes in den Rückspiegeln relevant. Serienreife Head-Tracking Systeme sind aus dem Bereich der Stereoprojektionen bekannt und werden z.B. in sog. Powerwalls zur Veranschaulichung von 3D-Objekten benutzt. Die Position des Betrachterkopfes wird dabei meist durch Marker am Fahrerkopf gekennzeichnet und z.B. über Infrarotkamerasysteme ermittelt (Abbildung 3-6). Die Implementierung eines Head-Tracking Systems ist nur dann sinnvoll, wenn damit keine Verzögerungen oder Ungleichförmigkeiten in die Bilddarstellung eingebracht werden [43]. Es sind keine Entwicklungssimulatoren mit Head-Tracking bekannt.

3.2.1.5 Rückspiegelansichten

Je nach Fahrzeugsart kann neben der Frontsicht die Nachbildung der Rückspiegelansichten für den Fahrvorgang wichtig sein. Während beim PKW die Rückspiegel hauptsächlich benutzt werden, um Informationen über den rückwärtigen Verkehr zu gewinnen, werden sie beim LKW auch für Stabilisierung und Spurhaltung genutzt. Um diese Anforderung zu erfüllen, muss in der Rückspiegelansicht ein Teil des Ego-Fahrzeugs sichtbar sein, der dem Fahrer eine direkte Rückmeldung über die Position des eigenen Fahrzeugs in der Fahrspur gibt. Für die Realisierung von Rückspiegelansichten sind drei Konzepte bekannt [29, 54, 69]:

Fahrzeugspiegel bleibt erhalten

Der originale Rückspiegel verbleibt in seiner ursprünglichen Form am Fahrzeug. Das Bildmedium ist ein ausreichend großer Bildschirm oder eine Projektionsfläche hinter dem Fahrer. Das Konzept bietet den Vorteil, dass eine Bewegung des Fahrers eine Veränderung des Bildinhaltes zur Folge hat. Der aus dem Realfahrzeug bekannte Prozess der Bewegungsparallaxe bleibt erhalten, was zum Präsenzepfinden beiträgt. Da das Bildmedium den gesamten einsehbaren Bereich abdecken sollte, wird aber die erforderliche Bildfläche meist recht groß, was einen erhöhten Kostenaufwand und einen stark vergrößerten Bauraumbedarf mit sich bringt. Es ergeben sich negative Folgen hinsichtlich Bewegungsenvelope und Zugänglichkeit (Abbildung 3-7).

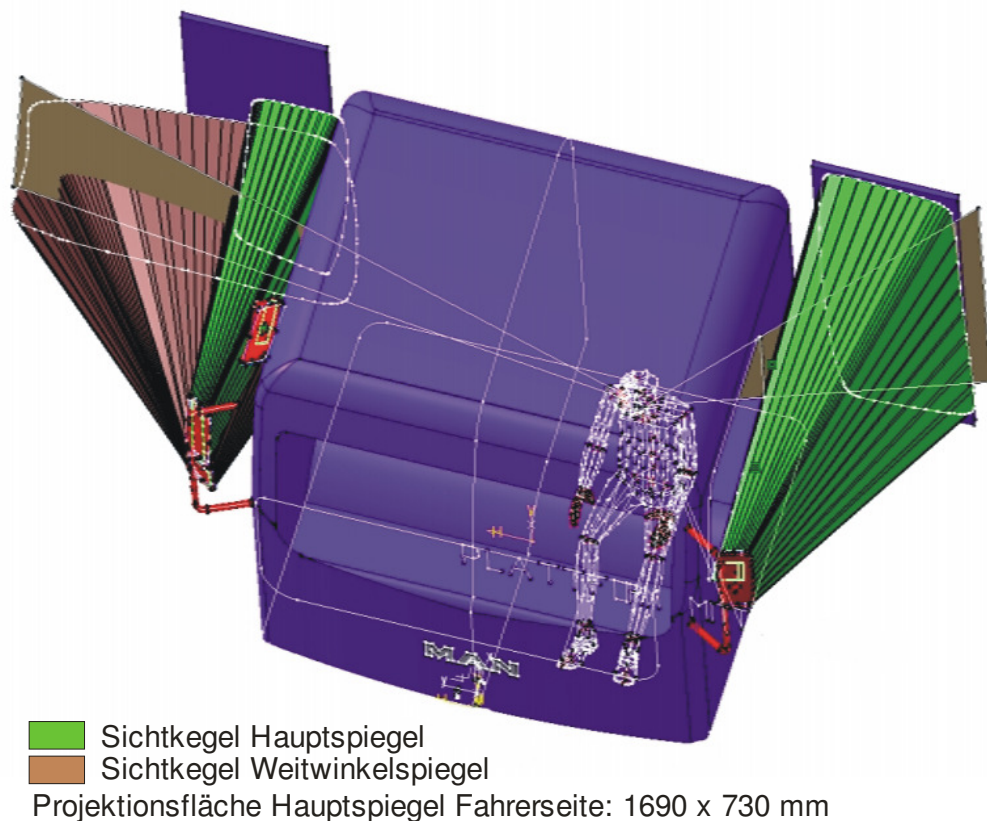


Abbildung 3-7: Rückspiegeldarstellung mit Originalspiegel, Konstruktionsbeispiel

Als funktionaler Hauptnachteil dieser Lösung ist zu sehen, dass das Realfahrzeug im Spiegel direkt sichtbar wird, die Umgebungsansicht aber virtuell erzeugt wird. Der direkte Positionsabgleich in einer gemeinsamen Ansicht ist somit nicht möglich. Die Implementierung der beiden Funktionen „Bewegungsparallaxe“ und „Positionsabgleich“ ist mit dieser Lösung nicht möglich.

Bildmedium ersetzt Fahrzeugspiegel

An der Stelle des Fahrzeugspiegels wird ein geeignetes Bildmedium (z.B. LC-Display, Abbildung 3-8) montiert, auf denen die Rückspiegelansicht dargestellt wird. Die Lösung ist mechanisch robust, Platz sparend und bietet gute Helligkeits- und Auflösungs-werte. Die Darstellung eines Teils des Ego-Fahrzeugs macht die Position des Fahrzeugs auf der Fahrbahn sichtbar und unterstützt daher die Stabilisierungsaufgabe. Der Effekt der Bewegungsparallaxe ist nicht gegeben.

Virtueller Rückspiegel

Bei einem virtuellen Rückspiegel wird die Ansicht der Originalspiegel in die Frontprojektion eingespielt (Abbildung 3-8). Diese Lösung erfordert keinen mechanischen Aufwand, ist aber nur bei Augabständen von ca. 1-1,5m empfehlenswert. Der Effekt der Bewegungsparallaxe ist nicht gegeben, der direkte Positionsabgleich des Fahrzeugs auf der Fahrbahn ist aber möglich. Die Lösung erfordert keinen Hardwareaufwand.



Abbildung 3-8: Rückspiegelansicht als LC-Display (links) und virtueller Rückspiegel (KMW, rechts)

3.2.1.6 Kontinuität der Frontsicht

Bei mehrkanaligen Frontsichtsystemen ergibt sich die Problemstellung, die Übergänge zwischen den Kanälen möglichst unauffällig zu gestalten, sodass ein durchgängiges Bild entsteht. Man kann davon ausgehen, dass eine Unterbrechung der Frontsicht durch vertikale Einschnitte, wie sie bei der Verwendung von Monitoren auftreten, das Präsenzzempfinden stark beeinträchtigt [8]. Die Unterbrechung des sog. optischen Flusses verschlechtert zudem die Geschwindigkeitseinschätzung.



Abbildung 3-9: Frontprojektion am FTM-Simulator mit und ohne Edge-Blending.
Im rechten Bild ist die Helligkeitsanpassung im Edge-Blending Bereich nicht aktiviert.

Wird die Frontsicht in Form einer Projektion realisiert, kann der Bildübergang in verschiedenen Ausführungen realisiert werden. Bei ebenen Projektionsflächen können die Bilder ohne Überlappungsbereich stumpf aneinandergereiht werden, wobei der Übergang hier meist nicht völlig unsichtbar wird, sondern eine dünne vertikale Nahtstelle zwischen den Projektionsflächen sichtbar bleibt. Bei kontinuierlich gekrümmten Projektionsflächen überlappen sich zumindest bei

den üblichen digitalen Projektoren konzeptbedingt die projizierten Bilder und die Inhalte der doppelt bestrahlten Bereiche müssen angeglichen werden. Im Überlappungsbereich stellt sich der doppelte Lichtstrom ein, was wiederum deutlich sichtbar ist. Wird in diesem Übergangsbereich auch die Leuchtstärke der Projektoren so angepasst, dass keine Unterschiede im Lichtstrom sichtbar sind, spricht man von Edge-Blending (Abbildung 3-9). Edge-Blending ist heute auch mit PC-Systemen möglich und darf als Stand der Technik für mehrkanalige Frontprojektionen gelten. Die Breite der Überlappung sollte etwa 10% der Bildbreite betragen. [31, 71]

Laserprojektion

Das Konzept der Bilderzeugung mittels Laserprojektion besitzt ein großes Leistungspotenzial, ist aber sehr kostenintensiv. Endgeräte wurden bislang nur von einem Hersteller in geringer Stückzahl produziert und sind nur sehr schlecht verfügbar. Bei dem Verfahren wird das Bild mittels dreier farbiger Laser und rotierender Umlenkspiegel zeilenweise auf das Projektionsmedium geschrieben. Hauptvorteile des Konzepts sind die sehr hohe Lichtleistung und die unterbrechungsfreie Projektion auf nahezu beliebig große Freiformflächen. Entwicklungssimulatoren mit Laserprojektion sind nicht bekannt. [213]

3.2.1.7 Bildqualität

Bildauflösung

Die hochwertige und detaillierte Darstellung der Fahrumgebung ist der zentrale Parameter für die Qualität des Bildinhalts [71]. Der mögliche Grad der graphischen Detaillierung wird durch die physikalische Auflösung des Bildmediums und die Qualität der Oberflächentextur bestimmt. Die ideale Größe der Bildpunkte auf dem Bildmedium kann mittels der Sehschärfe des menschlichen Auges und dem Abstand des Auges von der Leinwand errechnet werden. Dieser Wert ist abhängig von Helligkeit und Kontrast und liegt für normalsichtige Menschen bei etwa einer Winkelminute (ca. $0,017^\circ$). Bei einem Betrachtungsabstand von 3m entspricht das einer Pixelgröße von ca. 1mm. Aus der gewünschten Größe der Bildpunkte und der vorher bestimmten Projektionsfläche kann die erforderliche Auflösung des Projektors berechnet werden. Grundsätzlich erhöht sich die Qualität der Simulation kontinuierlich mit der Auflösung, sodass als Empfehlung gelten kann, die im finanziellen Rahmen bestmögliche Auflösung umzusetzen. Gegebenenfalls können die peripheren Kanäle mit einer geringeren Auflösung ausgestattet werden, da die Forderung nach hoher Auflösung vorrangig für den Hauptsichtbereich von $40-60^\circ$ horizontal gilt.

Eine Auflösung von 1 Bogenminute ist erforderlich, wenn die Lesbarkeit von Straßenschildern realistisch sein soll. Dieses Merkmal wird der Anschaulichkeit halber verwendet, weil es bewusst und unmittelbar wahrnehmbar ist [34]. Wenn die Lesbarkeit für die Anwendung nicht relevant ist, geben einige Quellen eine Auflösung von 2-3 Bogenminuten/Pixel als ausreichend an, um eine sehr gute Immersion zu erreichen. Ab einem Maß von 6-8 Bogenminuten/Pixel wird eine merkliche Verschlechterung der Immersion angegeben. Zudem ergeben sich Flimmer- und Unschärfefeffekte, welche das Präsenzepfinden stören. [1, 8, 52, 58]

In Abbildung 3-10 ist ein Bildausschnitt der Projektion des FTM Simulators in den Auflösungen SXGA+ und XGA² dargestellt. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der Erkennbarkeit der Schrift auf den Verkehrsschildern.

Technik

Die Bilderzeugung und –darstellung für professionelle, mehrkanalige Anwendungen war bis in die 90er Jahre nur mit speziellen Grafik-Workstations und Kathodenstrahl-Projektoren (Cathode-Ray-Tube, CRT) möglich. Mit solchen Systemen wurden Auflösungen bis zu 3200x2400 (QUXGA) realisiert. Ein Konzeptmerkmal der CRT-Projektoren ist die sog. Infinite-

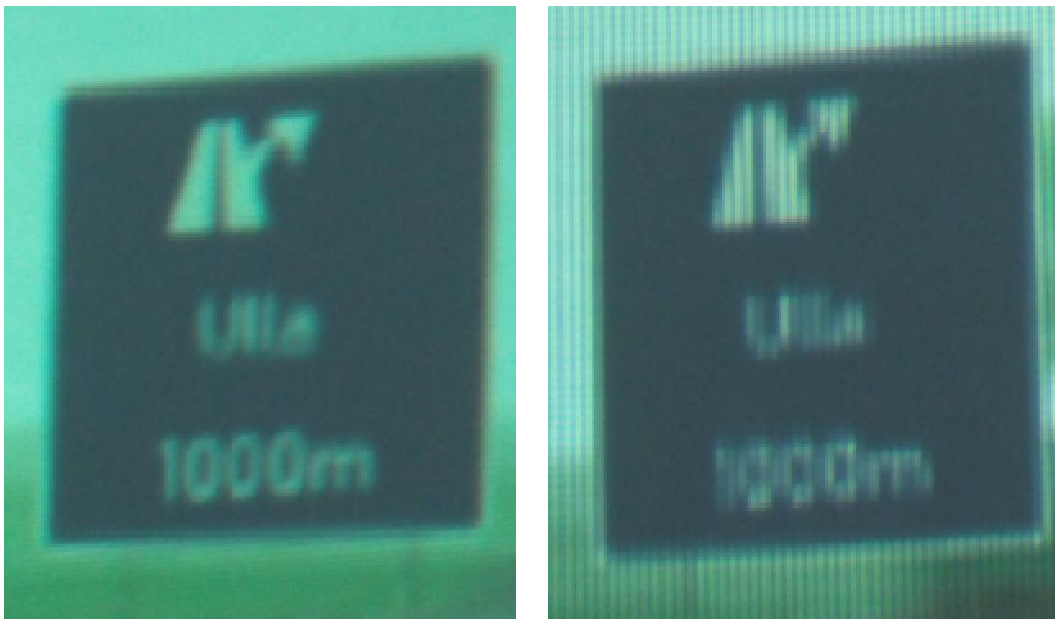


Abbildung 3-10: Ausschnitt der FTM Frontprojektion mit 1400x1050 Punkten und 1024x768 Punkten Auflösung, (Winkelauflösung 2,35 bzw. 3,21 Bogenminuten/Pixel)

Adress-Ability, bei der keine diskreten Bildpunkte, sondern ein analog-kontinuierliches Bild dargestellt wird. Diese Auflösungen übersteigen bei einem Projektionsabstand von ca. 3m die Sehschärfe des menschlichen Auges und können in diesem Kriterium bis heute nicht von einer anderen Technologie übertroffen werden. CRT-Projektoren besitzen zudem im Gegensatz zu digitalen Projektoren eine sehr geringe Neigung zum Verwischen der Bildinhalte (Blurring-Effekt) bei schneller Bewegung, was beim Abbiegen an Kreuzungen und im peripheren Sichtbereich bei schneller Fahrt die Schärfe der bewegten Bildinhalte gewährleistet. Geometriekorrekturen zur Anpassung der Bildinhalte an eine nicht ebene Projektionsfläche wurden ebenso wie das Edge-Blending durch Ablenkung und Modulation des Elektronenstrahls im Projektor realisiert. Den Vorteilen der CRT-Projektoren stehen vielfältige Nachteile gegenüber. So liegen Anschaf-

² SXGA+: 1400x1050 Punkte, XGA: 1024x768 Punkte

fungs- und Instandhaltungskosten etwa um den Faktor 10 über dem der Kombination eines PC-basierten Systems mit Digitalprojektoren. Zudem ist gerade bei mitbewegten Projektoren die ständige Nachjustierung der 3 Röhren erforderlich. Dies lässt die CRT-Technologie als nicht zukunftsfähig für den Einsatz in Simulatoren erscheinen, zumal entsprechende Geräte kaum noch produziert werden.

Bei den konzeptbedingt mit einer höheren Reaktionszeit versehenen LCD-Paneelen kann in dynamischen Situationen das Bild verwischen, was zur kurzzeitigen Desorientierung führen und damit die Simulatorkrankheit verstärken kann. Heutige PCs und Grafikkarten aus dem Hochpreissegment des Consumerbereichs erlauben aber eine Bildberechnungsrate von weit über 60Hz bei einer Auflösung bis 1600x1200 Punkten (UXGA). Zusammen mit den immer weiter verringerten Reaktionszeiten digitaler Projektoren ($<8\text{ms}$) kann der Blurring-Effekt aber minimiert werden. Seitdem PC-basierte Systeme in der Lage sind, Geometriekorrekturen und Edge-Blending zu berechnen, können auch digitale LCD-, D-ILA-, LCOS- oder DLP-Projektoren in hochwertigen Simulatorsystemen zum Einsatz kommen. Hauptvorteile sind neben dem geringeren Preis die höheren Lichtleistungen, die kompaktere Bauweise und die bessere Verfügbarkeit [214].

Bildberechnung

Die verzögerungs- und ruckfreie Darstellung der Bildinhalte ist gemäß einer Studie wichtiger für das Präsenzempfinden als die Auflösung [52, 71]. Maßgeblich dafür sind die Bildberechnungsrate des PCs und die Bilderneuerungsrate des Bildmediums, welche beide in frames-per-second (Einzelbilder pro Sekunde) angegeben werden. Die Schnelligkeit der Bilderzeugung gewinnt an Bedeutung, wenn bei hohen Geschwindigkeiten gefahren wird und, wenn der periphere Sichtbereich abgedeckt wird. Die dort befindlichen Objekte werden vom Fahrer senkrecht zur Fahrtrichtung und deshalb mit der schnellsten Relativgeschwindigkeit wahrgenommen. So macht der Versatz eines Objekts zwischen zwei Einzelbildern bei einer Frame-Rate von 60Hz und einer Fahrgeschwindigkeit von 100km/h bereits 0,46m aus.

Die Bildberechnungsrate wird von der Rechenleistung des Prozessors, dem Grafikchip und der Größe des Grafikkartenspeichers bestimmt, in den die Texturen der Datenbasis geladen werden [43, 81]. Da es sich in der Regel nicht um Echtzeitsysteme handelt, wird bei der technischen Beschreibung mit Minimalwerten gearbeitet (z.B. Frame Rate $> 30\text{Hz}$). Die Bildberechnungsrate des PCs ist im Gegensatz zur Bilderneuerungsrate des Bildmediums abhängig von der Komplexität und der Dynamik der dargestellten Inhalte, welche durch die Anzahl der zu berechnenden Polygone bestimmt wird. Die Optimierung nur eines dieser Merkmale ist nicht sinnvoll. Mit PC-basierten Sichtsystemen können heute Frame-Rates von mehr als 60Hz realisiert werden.

Damit die berechneten Bilder ohne Verzögerung projiziert werden können, sind Projektoren mit geringen Reaktionszeiten erforderlich. Als Reaktionszeit wird die Zeit bezeichnet, die ein Pixel der Matrix benötigt, um von Hell nach dunkel zu wechseln. CRT-Projektoren arbeiten fast ohne Verzögerung, wohingegen bei heutigen LCD-Projektoren der Blurring-Effekt, also das

Verwischen der Bildinhalte, auftritt. Die Reaktionszeit der LCD-Paneele sinkt mit der Schichtdicke der Flüssigkristallschicht und ist bei heutigen Geräten bei unter 8ms angelangt [214]. Da diese Kenngröße je nach der Kombination von Hardware und Betriebssystem stark unterschiedlich sein kann, muss hier zwingend der Hersteller befragt werden. Auch wird dringend zu einem Hardwaretest mit der endgültigen PC-Projektor-Kombination geraten. Bei höherwertigen Geräten kann die Abstimmung ggf. durch spezielle Firmware verbessert werden.

Die Bildberechnung und -darstellung ist nur ein Glied in der Kette der Bilderzeugung, ausgehend von der Fahrereingabe. Der entsprechende Vorgang in der Realität ist der Aufbau der Giergeschwindigkeit bei Lenkeingaben bzw. das Auftreten von Nickbewegungen beim Beschleunigen oder Bremsen. Der Wert ist für die Simulation sensibel einzustellen, da Studien zeigen, dass bei einer übermäßigen Erhöhung des Zeitverzugs vermehrt Simulatorkrankheit auftritt. Zudem werden durch die Sichtsimulation bestimmte Nebenaufgaben schlechter erledigt, weil die unrealistische Fahrzeugreaktion vermehrt Aufmerksamkeit für die Stabilisierung erfordert. [43, 71]

Vergleichbares gilt für die vestibuläre Wahrnehmung. Es ist aber nicht sinnvoll, diesen Zeitverzug zu minimieren, da auch die Fahrzeugreaktionen in der Realität mit einer leichten Verzögerung erfolgen. Typische Werte für längs- und querdynamische Reaktionen auf Fahrereingaben liegen je nach Fahrzeugtyp bei 100-200ms [74].

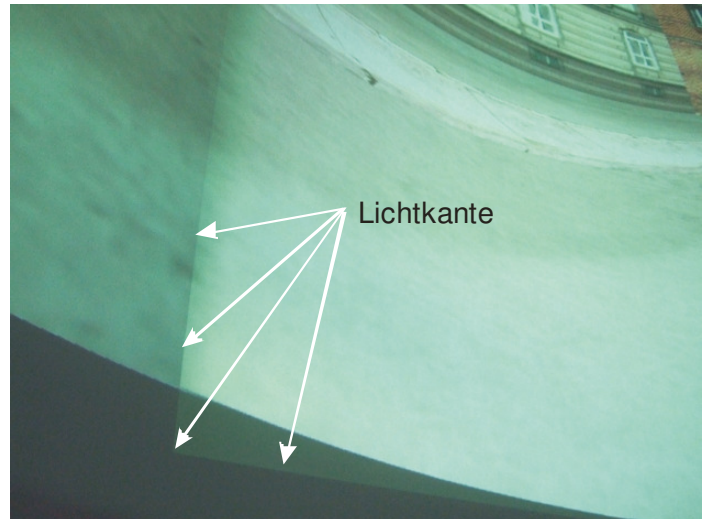
Helligkeit, Kontrast und Farbtreue

Das mit hoher Auflösung, realitätsnaher Textur und ausreichender Schnelligkeit berechnete Bild soll in einer qualitativ hochwertigen Endform dargestellt werden. Mit der Bildauflösung bestimmen die drei optischen Kriterien Helligkeit, Kontrast und Farbtreue diesen Sinneseindruck. Damit ein projiziertes Bild gut erkannt werden kann, sollte das Verhältnis zwischen Raumlicht und Bildhelligkeit 5:1 oder höher betragen [200]. Dieses Verhältnis kann durch Absenken der Raumhelligkeit oder durch die meist Kosten treibende Anhebung der installierten Lichtleistung des Projektors verbessert werden.

Gemäß den Erfahrungen am FTM-Simulator ist es nicht sinnvoll, den Projektionsraum vollständig abzudunkeln, da sonst auch der Fahrzeuginnenraum wenig beleuchtet und somit für Tagfahrt-Szenarien unrealistisch erscheint. In Kapitel 4.1 findet sich beispielhaft für den FTM-Simulator die Auslegungsrechnung für die Bildhelligkeit.

Ein gutes Kontrastverhältnis des Bildmediums verbessert einerseits die Brillanz der Bilder und ermöglicht es andererseits, die meist einstellbare Leuchtstärke des Projektors maximal auszunutzen. Bei einem schlechten Kontrastverhältnis (Anhaltswert: <1000:1) werden in diesem Fall die durch das Edge-Blending abgestimmten Bildübergänge als leicht beleuchtete Umrisse sichtbar (Abbildung 3-11).

Abbildung 3-11: Bei Ausnutzung der maximalen Helligkeit des Projektors und einem nicht ausreichenden Kontrastverhältnis wird die Qualität des Edge-Blendings verschlechtert



Da alle Bildmedien auf dem Prinzip der additiven Rot-Grün-Blau (RGB) Farbmischung beruhen, kann nur das entsprechende RGB-Farbspektrum erzeugt werden, welches nicht alle Farben der menschlichen Wahrnehmung nach dem CIE-Normvalenzsystem abdeckt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Darstellung natürlicher Farben einen unterschwellig Einfluss auf das Realitätsempfinden hat. Neue LCD-Projektoren bieten durch die Verwendung von 4 LCD-Paneelen die Möglichkeit zur Verbesserung der Farbdarstellung.

3.2.1.8 Gesamtkonzepte

Aus den Vorüberlegungen zur Dimensionierung und Leistungsfähigkeit des Sicht- und Bewegungssystems ergibt sich meist zwangsläufig auch ein Gesamtkonzept des Simulators. Die zu Grunde liegenden Zusammenhänge sind im Folgenden beschreiben.

Fixed- oder Flying-Screen

Die Entscheidung, ob das Sichtsystem auf dem Hauptbewegungssystem montiert werden soll (Flying-Screen), oder nicht mitbewegt wird (Fixed-Screen) bestimmt wesentlich die Konstruktion und die Kosten des gesamten Prüfstands. Beim Konzept Flying-Screen wird das Bildmedium mitbewegt, weshalb eine Hauptanforderung dieser Lösung ist, die Komponenten der Projektion entsprechend steif und fest auszulegen (Abbildung 3-12). Erschwert wird diese Aufgabe durch den Zielkonflikt, welcher sich zwischen der Auslegung des Augabstands und der Außenabmessung ergibt. Je größer der Augabstand gewählt wird, desto ausladender wird die Konstruktion. Eine Folge ist der Anstieg der zu bewegenden Masse und damit der erforderlichen Nutzlastkapazität des Bewegungssystems. Da bei gleichem Augabstand die Außenabmessungen einer Auflichtprojektion erheblich geringer sein können als bei der Rücklichtprojektion, wird diese meist für Flying-Screen Simulatoren gewählt. Diese Anordnung erfordert die Platzierung der Projektoren über dem Fahrzeug-Mockup. Um den Sichtbereich des Fahrers nicht zu beeinträchtigen,

kann die Abstützung dieser Massen nicht innerhalb des Projektionsraumes erfolgen. Dieser Umstand erschwert und verteuert die Konstruktion des Projektionsaufbaus zusätzlich.



Abbildung 3-12: Flying-Screen Simulatoren in Aufsichtprojektion (links) und Rücklichtprojektion (Mitte), [Daimler-Chrysler, Berlin und DLR, Braunschweig]

Wird eine Rücklichtprojektion mit dem Bewegungssystem mitbewegt, ist Sorge zu tragen, dass die Projektionsleinwand nicht durch die Anregung in Schwingungen gerät. Eine ausgeführte Lösung ist die Verwendung ebener Trägersegmente aus durchsichtigem Kunststoff für die Rückprojektionsfolie. Die Veränderung des Betrachtungswinkels innerhalb eines Segments und v.a. an den Modulübergängen führt aber zu deutlich sichtbaren Helligkeitsunterschieden im Modul und einem deutlich merkbaren Übergang zwischen den Modulen.

Monitoranordnungen und Projektionsarten

Als Bildmedien kommen entweder Monitore oder Videoprojektoren in Kombination mit einer Leinwand in Frage. Sichtsimulationen mit Monitoren sind mit 1 bis 5 Monitoren realisiert, die in der Regel zwischen 0,6 bis 1,2m vom Fahrerraum entfernt installiert sind. Hauptvorteil ist die hohe Auflösung, die gute Bildhelligkeit und der hohe Kontrast heutiger Geräte bei gleichzeitig geringer Reaktionszeit (<8ms). Nachteil ist die fehlende Akkomodation, der vertikal beschränkte Sichtbereich und vor allem die Diskontinuität des Bildes aufgrund der Bildschirmumfassungen.

Die Aufsichtprojektion zeichnet sich dadurch aus, dass sich Betrachter und Projektor auf der gleichen Seite der Leinwand befinden. Für dieses Projektionskonzept sind alle digitalen und analogen Projektoren geeignet. Da das Licht keine Leinwand passieren muss, erfolgt im Gegensatz zur Rücklichtprojektion keine Reduktion des Lichtstroms. Bekannt sind Simulatoren mit 1 bis 15 Projektoren in Fixed-Screen und Flying-Screen Ausführung, bei denen die Projektoren meist über und hinter dem Fahrzeug-Mockup platziert sind. Das Konzept eignet sich sehr gut zur Erzeugung eines durchgängigen Bildes über einen beliebigen horizontalen Bereich, wobei die Pro-

jektionsfläche nicht lichtdurchlässig sein muss. Insbesondere bei hohen Fahrzeugen (z.B. LKW) kann es zu Abschattungen des Strahlengangs durch das Fahrzeug-Mockup kommen. Diese Problematik verschärft sich bei Fixed-Screen Projektionen, weil der Bewegungsumfang des Bewegungssystems berücksichtigt werden muss. Das Problem wird in der Regel gelöst, indem die Projektoren sehr hoch platziert werden (Abbildung 3-13). Der schiefe Einstrahlwinkel erfordert eine Trapezkorrektur des Projektorbildes, was im Fall von digitalen Projektoren mit einem Verlust an Auflösung verbunden ist. [6, 8, 24]

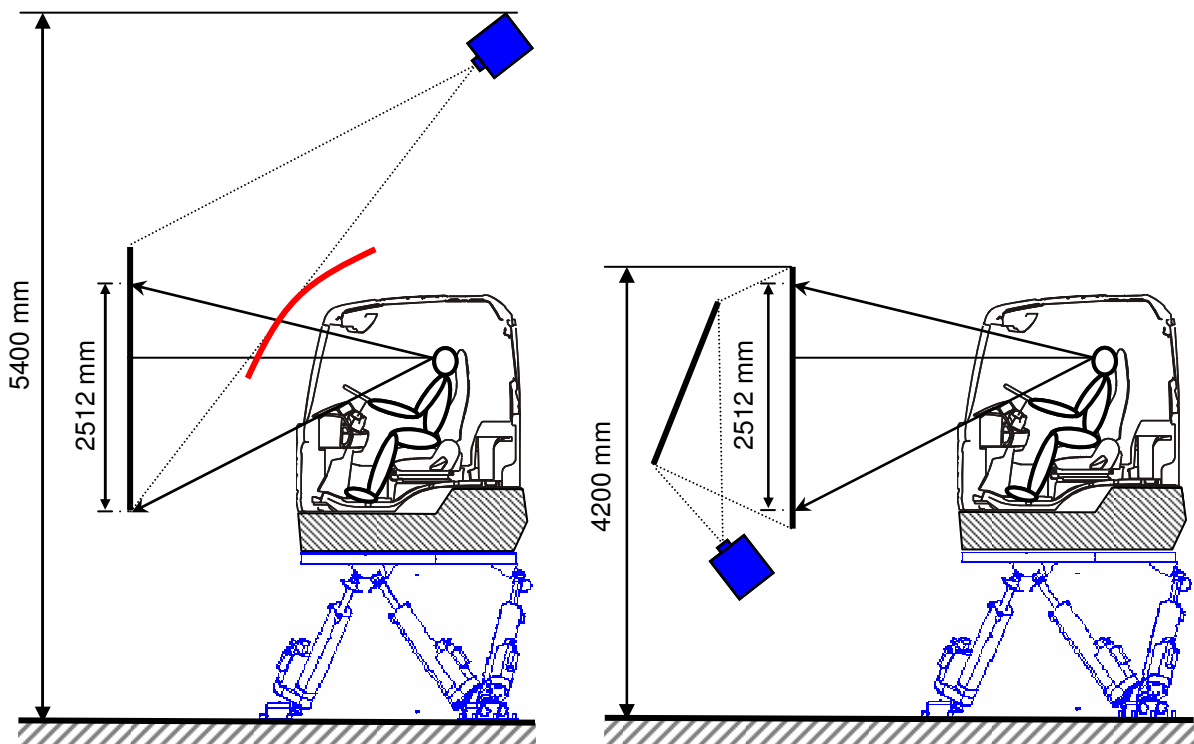


Abbildung 3-13: Konzeptskizzen mit Gesamthöhe für Aufsicht- und Rücklichtprojektion am FTM-Simulator (rot: Bewegungsenveloppe Fahrerhaus)

Bei der Rücklichtprojektion befinden sich Betrachter und Projektor auf unterschiedlichen Seiten der Leinwand. Bekannt sind Simulatoren mit zwischen 1 und 8 Projektoren, die meist hinter und unterhalb der Leinwand platziert sind. Im Gegensatz zur Aufsichtprojektion gibt es keine Beeinträchtigung des Strahlengangs durch das Fahrzeug-Mockup. Um Bauraum zu sparen und trotzdem eine senkrechte Anstrahlung ohne Auflösungsverlust oder Helligkeitsunterschiede zu realisieren, wird der Projektionsstrahl meist über Umlenkspiegel auf die Leinwand gelenkt (s. Abbildung 3-13).

Als Projektoren sind lichtstarke LCD und DLP Geräte vor CRT-Projektoren zu bevorzugen, da das Projektionskonzept einen Verlust an Lichtleistung durch Umlenkspiegel und Leinwand bedingt. Zur Umfassung des Strahlengangs ist eine bauraumintensive Konstruktion erforderlich.

Da die Unterbringung des ausladenden Sichtsystems auf einem Bewegungssystem aufwändig ist, bietet sich die Ausführung als Fixed-Screen Simulator an [200, 24].

Bei der sog. Kollimator-Projektion sieht der Proband das Bild über einen Spiegel, der oft gekrümmt ist, sodass die projizierte Fläche klein sein kann. Es handelt sich um ein Konzept, das bei einkanaliger Sicht eine sehr kompakte Bauform ermöglicht. Dies ist vor allem bei der Montage auf einem Bewegungssystem vorteilhaft. Kollimatorprojektionen mit mehreren Bildkanälen sind nicht bekannt.

3.2.1.9 Typische Ausführungen der Sichtsimitation

Aus den Betrachtungen zur Sichtsimitation und den Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung lassen sich die Ausführungsstufen in Tabelle 3-1 ableiten.

Merkmale	Nr.	Ausführung
Konzeptmerkmale		
Abstand vom Fahrerauge	A1	< 0,8m : Effekt der Akkomodation nicht gegeben
	A2	2,5-3m : Akkomodationsstrecke wird zwischen Instrumenten und Sichtsystem wird zu ca. 95% fast komplett durchlaufen
	A3	> 5m : Effekt der Akkomodation voll gegeben
Sichtbereich	B1	Hauptsichtbereich (40°-60°) : Ausreichende Geschwindigkeitseinschätzung bei niedrigen Geschwindigkeiten
	B2	Teilsicht (120°-140°) : Hauptbereich zur Ausbildung des optischen Flusses, gute Geschwindigkeitseinschätzung
	B3	Vollsicht (180°-220°) : horizontaler Sichtbereich nach vorne komplett abgedeckt
	B4	Rundumsicht (360°)
Stereosehen	C1	Merkmale vorhanden : Bessere Abstandswahrnehmung im Nahbereich
Head-Tracking	D1	Merkmale vorhanden : Bewegungsparallaxe gegeben, bessere Abstandswahrnehmung im Nahbereich, besseres Präsenzepfinden
Rückspiegelansichten	E1	Fahrzeugspiegel bleibt erhalten : <ul style="list-style-type: none"> • Immersion gut; gute konstruktive Umsetzung schwierig • Bewegungsparallaxe gegeben • Direkter Positionsabgleich Fahrzeug-Straße nicht möglich
	E2	Bildmedium ersetzt Spiegel : <ul style="list-style-type: none"> • Mechanisch robust, gute Bildqualität • Bewegungsparallaxe nicht gegeben • Direkter Positionsabgleich Fahrzeug-Straße möglich
	E3	Virtueller Spiegel : <ul style="list-style-type: none"> • Kein mechanischer Aufwand • Bewegungsparallaxe nicht gegeben • Direkter Positionsabgleich Fahrzeug-Straße nicht möglich
Kontinuität der Frontsicht	F1	Einzelkanäle : Frontsichtbereich durch vertikale Einschnitte unterbrochen

Merkmal	Nr.	Ausführung
Kontinuität der Frontsicht	F2	Ohne Überlappungsbereich: Kanäle stumpf aneinandergereiht, ebene Projektionsflächen erforderlich, Trennkanten sichtbar
	F3	Edge-Blending: Kanäle überlappend, keine Helligkeitsunterschiede im Übergangsbereich, idealer optischer Fluss bei Mehrkanalprojektionen
Merkmale der Bildqualität		
Auflösung	G1	>6 Bogenminuten/Pixel: Lesbarkeit von Straßenschildern merklich schlechter als Realität, schlechte optische Qualität
	G2	2-3 Bogenminuten/Pixel: Lesbarkeit von Straßenschildern vergleichbar Realität, optische Qualität für Fahraufgabe gut ausreichend
	G3	<1 Bogenminute/Pixel: Lesbarkeit von Straßenschildern entspricht der Realität, optische Qualität optimal
Bildberechnung	H1	<ul style="list-style-type: none"> • Frame Rate > 60Hz: Stand der Technik bei PC basierten Sichtsystemen
Projektoren	J1	<ul style="list-style-type: none"> • Helligkeitsverhältnis > 5:1: Mindestwert zwischen Umgebungslicht und Projektion • Kontrast >1000:1: klarere Darstellung, bessere Erkennbarkeit der Bildinhalte
	J2	<ul style="list-style-type: none"> • Reaktionszeit <8ms: Darstellung schneller Bildänderungen ohne Verwischungseffekte (Blurring) möglich

Tabelle 3-1: Typische Ausführungen der Sichtsimulation

3.2.2 Bewegungssimulation

Die Bewegungssimulation ist der zweite große Themenkomplex in den Veröffentlichungen zur Simulatortechnik. Der Beitrag der Bewegungssimulation zur Güte der Gesamtsimulation wird weniger eindeutig beurteilt als bei der Sichtsimulation. Da das Bewegungssystem für Konzept und Kosten eine zentrale Rolle spielt, soll hier aufgezeigt werden, für welche Anwendungen ein Bewegungssystem erforderlich ist und wie es ausgeführt werden sollte. [26, 49, 95]

Beitrag zur Simulation

Das Gleichgewichtsorgan des Fahrers nimmt bei der Realfahrt translatorische und rotatorische Beschleunigungen wahr. Vestibuläre Informationen bedürfen keiner intellektuellen Interpretation. Die Reaktion auf diesen Sinneseindruck ist sehr schnell, unbewusst und läuft außer bei Fahranfängern vorrangig auf der fertigkeitbasierten Ebene ab. In der Fahrsimulation versucht man, diese Reize durch Bewegungssysteme synthetisch nachzubilden. Buld [17] spricht in einer vergleichenden Studie über verschiedene Untersuchungen zum Beitrag von Bewegungssystemen zur Güte der Simulation von einer insgesamt uneinheitlichen Befundlage.

In verschiedenen Veröffentlichungen kann nicht für alle Anwendungen der Nutzen eines Bewegungssystems nachgewiesen werden. Für bestimmte Fahrsituationen, wie z.B. das Spurverhalten bei Geradeausfahrt, haben Aspekte wie der Vorausschaupunkt und die Orientierung an Merkmalen der Umgebung eine größere Bedeutung als die kinästhetische Rückmeldung [80]. Die überraschend unterschiedlichen Ergebnisse sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen:

- Die veröffentlichten Angaben umfassen meist nur die technischen Daten der Bewegungssysteme. Die Beschreibung von Bewegungssystem durch ihre technischen Leistungsmerkmale, ist für die Interpretation und Gegenüberstellung von Versuchsergebnissen nicht zulässig, da die eigentliche Bewegung durch die Abstimmung des Bewegungssystems, das so genannte Motion-Cueing, mitbestimmt wird. Diese Abstimmungen können sich von Anlage zu Anlage gravierend unterscheiden. Aussagekräftig wäre in diesem multidimensionalen und sensiblen Parameterraum allein die Gegenüberstellung von im Fahrerhaus gemessenen Bewegungsgrößen auf einheitliche Fahrereingaben.
- Das Fahrerverhalten ist von der Gesamtheit der Sinneseindrücke abhängig. Ein Vergleich verschiedener Prüfstände ist daher nicht zulässig, da meist mehrere Parameter verändert werden.
- Die Ergebnisse eines Simulatorversuches hängen immer vom Versuchsablauf und dem durch den Fahrer induzierten nicht-aufgabenbezogenen Verhalten ab.

Der verallgemeinernde Quervergleich unterschiedlicher Versuchsreihen über den Nutzen eines Bewegungssystems für die Fahrsimulation kann demnach nicht zu einer einheitlichen Aussage führen. So hat die Bewegungsinformation für die Stabilisierungsaufgabe eine völlig andere Bedeutung als für eine tertiäre Bedienungsaufgabe. Während sie im ersten Fall ursächlich verantwortlich ist für die Aktivierung eines Reiz-Reaktionsmechanismus, ist sie im zweiten Fall lediglich eine Störgröße, welche auf die Erfüllung der tertiären Aufgabe wirkt, indem sie den Fahrer unterschiedlich stark beansprucht. Hier kommen zudem die Erfahrung des Probanden und seine psychologische Einstellung gegenüber der Nebenaufgabe zum Tragen. Als allgemein richtig für die Konzipierung eines Simulators können folgenden Aussagen gelten [26]:

- Eine qualitativ richtig abgestimmte Bewegungssimulation bewirkt keine Verschlechterung des Fahrerverhaltens, wenn die Realfahrt als Maßstab und die Fahrt ohne Bewegungssystem als Referenz dient.
- Einen kausalen Beitrag im regelungstechnischen Sinn liefert die Bewegungssimulation hauptsächlich auf der Stabilisierungsebene der primären Fahraufgabe. Für das antizipatorische Verhalten spielt sie eine untergeordnete Rolle.
- Für sekundäre und vor allem tertiäre Aufgaben ist die Bewegungsinformation regelungstechnisch als Störgröße zu sehen. Da sie aber die primäre Fahraufgabe erleichtert und somit mentale Ressourcen freigibt, wird sich das meist positiv auf die Erfüllung einer Nebenaufgabe auswirken.

Grundlagen der Beschleunigungssimulation

In der Fahrzeugtechnik werden die Bewegungen des Fahrzeugs in Bahnbewegungen und Aufbaubewegungen unterschieden. Die Bewegungen Huben, Nicken und Wanken der Karosserie gegenüber der Fahrbahn werden üblicherweise in einem karosseriefesten, horizontierten Koordinatensystem beschreiben, die Bahnbewegungen in einem Inertialsystem. Abbildung 3-14 zeigt

die bei der Realfahrt auftretenden Quer- und Längsbeschleunigungen, die ggf. über einen Zeitraum von mehreren Sekunden aufrechterhalten werden müssen [74].

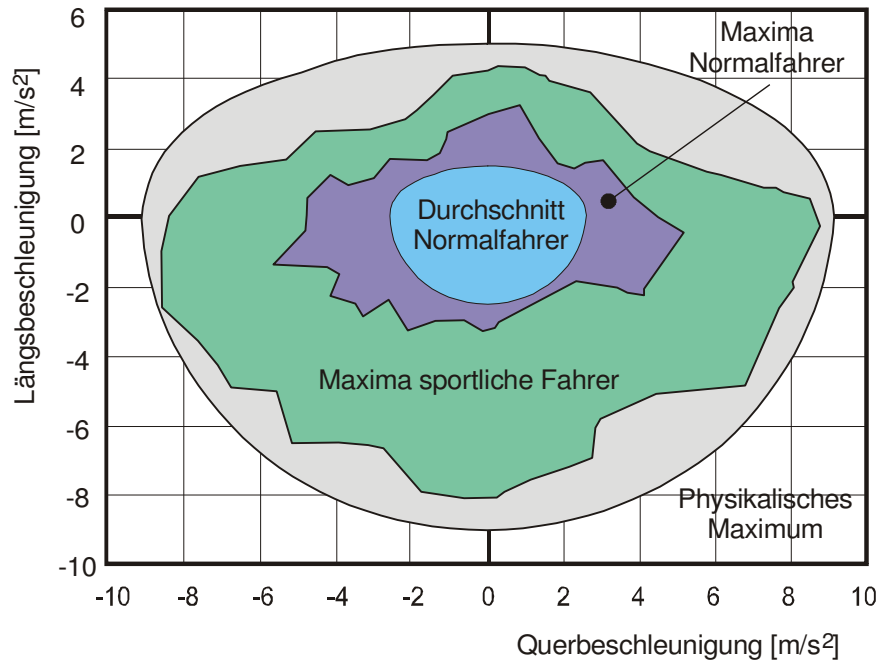


Abbildung 3-14: Gemessene Beschleunigungspotenzialausnutzung von Normalfahrern und sportlichen Fahrern (PKW) [202]

Während Aufbaubewegungen leicht nachgebildet werden können, da sie keine großen Verfahwege erfordern und das Integral über die Verfahwege auch in kurzen Zeitintervallen immer Null ergibt, sind die aus der Realfahrt resultierenden Bahnbeschleunigungen mit bekannten Bewegungssystemen nicht unverfälscht darzustellen. Die drei Bahnbewegungsgrößen Translation in x- und y-Richtung und Gieren bestimmen die Bahn des Fahrzeugs relativ zu seiner Umgebung. Wenn alle drei Größen unverfälscht nachgebildet werden sollen, ergibt sich zwangsläufig der Fahrkurs mit den realen Abmessungen. Um trotzdem eine verbesserte Beschleunigungsdarstellung bei geringem Platzbedarf zu erreichen, werden drei Methoden angewendet:

Neigungssimulation mit Washout

Eine anfänglich translatorische Bewegung wird schrittweise durch eine Neigung des Fahrers ersetzt, wobei dessen Vestibularorgan einen Teil der Erdbeschleunigung als Quer- oder Längsbeschleunigung wahrnimmt. Der Aufbau dieser Nick- und Wankwinkel wird als Neigungssimulation bezeichnet, die Rückführung der Bewegungsplattform in die Nulllage, um neue Beschleunigungen und Neigungen darstellen zu können als Washout. Die Methode ist durch zwei Faktoren limitiert. Zum einen sollte der Fahrer nicht um mehr als 25° geneigt werden, da er die Neigung dann als Schiefstellung des Körpers und nicht als translatorische Beschleunigung wahrnimmt [49, 77, 86]. Die weitaus größere Einschränkung ergibt sich zum anderen aus der Wahrnehmungsschwelle des Menschen für Drehbeschleunigungen, die, abhängig von der absoluten Höhe

der Beschleunigung und der Einwirkdauer, bei ca. $2\text{-}6^\circ/\text{sec}^2$ liegt. Liegt die im Washout-Algorithmus angewandte Winkelbeschleunigung über dieser Merkschwelle, nimmt der Fahrer dies als Kippbewegung wahr, was im Vergleich zur Realfahrt einen qualitativ falschen Eindruck erzeugt. Wenn mit Winkelbeschleunigungen unterhalb dieser Merkschwelle gearbeitet wird, ist der Beitrag der Neigung zur Beschleunigungssimulation bei dynamischen Manövern so gering, dass praktisch keine Verbesserung eintritt. Je dynamischer das Manöver, desto schneller muss eine eventuelle Rückführbewegung sein, was gerade bei großen Neigungsauslenkungen eine stark von der Realität abweichende Bewegungsinformation erzeugt. Nur bei lang andauernden Beschleunigungen wie der Kurvenfahrt oder bei Komfortbremsungen erbringt die Neigungssimulation unterhalb der Merkschwelle einen merklichen Beitrag. In der Regel wird in Simulatoren, welche die Neigungssimulation anwenden, die Merkschwelle überschritten [22, 43, 92].

Skalierungsfaktoren

Eine Möglichkeit, Beschleunigungen qualitativ richtig darzustellen, bleibt die Skalierung der durch das Fahrdynamikmodell berechneten Beschleunigungen. Als kleinster Skalierungsfaktor für eine hinreichende Darstellung der Bewegungsinformation wird 0,35 angegeben [37, 54]. High-End Simulatoren mit Schienensystemen zur Erzeugung translatorischer Beschleunigungen geben Skalierungsfaktoren von 0,5 und größer an [93]. Es ist anzunehmen, dass dieser Skalierungsfaktor nicht über den gesamten Frequenzbereich realer Fahrmanöver eingehalten wird.

Darstellung von translatorischen Beschleunigungen durch Fliehkräfte

Quer- und Längsbeschleunigungen können erzeugt werden, indem die Fahrkabine ein Kurvensegment fährt. Das Fahrzeug-Mockup wird dabei so angestellt, dass der Fahrer die Fliehkräfte als die gewünschte Beschleunigungskraft wahrnimmt. Diese Methode erfordert ein Bewegungssystem mit zwei translatorischen (z.B. Schienensystem) und einem rotatorischen Freiheitsgrad (z.B. Turntable), um die Verfahwege und die Ausrichtung des Mockups zu gewährleisten. Auch selbstfahrende Simulatorkabinen sind angedacht, aber bis jetzt nicht realisiert.

Die Methode bietet den Vorteil, die translatorischen Beschleunigungen gut darstellen zu können, erfordert aber einen sehr hohen Hardwareaufwand. Mittels der Fliehkraftsimulation kann der zur Darstellung von Beschleunigungen erforderliche Platzbedarf reduziert werden. Abbildung 3-15 zeigt den Verlauf einer Fahrstrecke und den Verfahweg eines mit der Fliehkraftsimulation berechneten Kurses, bei dem die gleichen translatorischen Beschleunigungen auftreten [201]. Es werden die geringen Kurvenradien und die damit verbundene Überhöhung der Giergeschwindigkeit sichtbar. Die Berechnung setzt das Wissen um die auftretenden Beschleunigungen voraus, kann nur offline, also im offenen Regelkreis realisiert werden. Realisierte Ausführungen sind nicht bekannt.

Die Giergeschwindigkeit als dritte Bewegungsgröße muss zu diesem Zweck erheblich verfälscht werden, da der Fahrer ggf. eine sehr hohe Drehgeschwindigkeit um die Hochachse erfährt. Der Überhöhungsfaktor der Giergeschwindigkeit ist der Hauptparameter zur Reduzierung des Platzbedarfs. Dadurch treten unrealistisch gerichtete Fliehkräfte in den Extremitäten auf, da

diese nicht im Zentrum der Drehung zu liegen kommen. Es ist mit negativen Auswirkungen hinsichtlich der Kinetose zu rechnen.

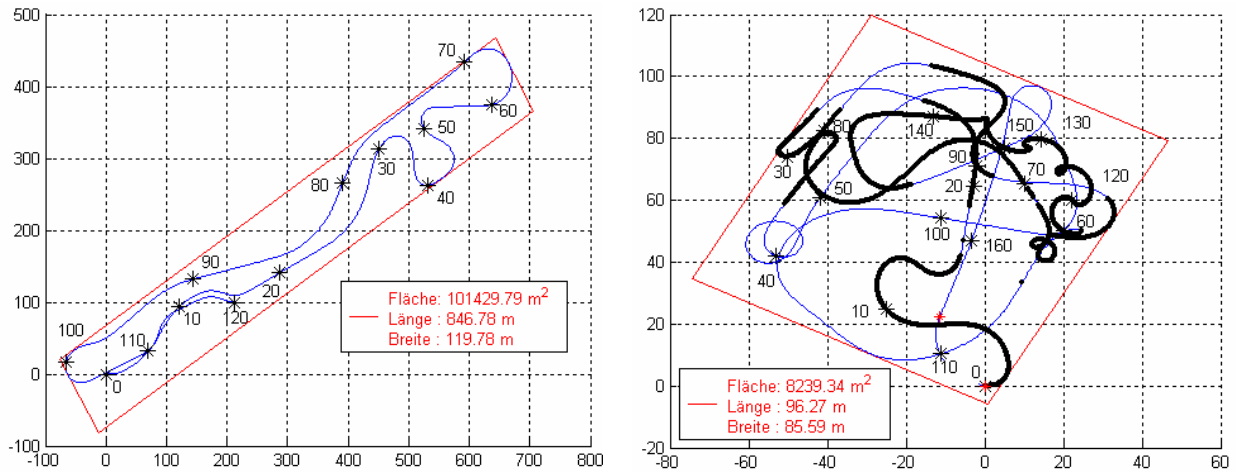


Abbildung 3-15: Handling Strecke und synthetisch erzeugter Verfahrkurs eines Simulators mit Fliehkraftsimulation

Die physikalischen Grundlagen der Beschleunigungssimulation werden in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt [43, 86]. Im Folgenden sind die Leistungsmerkmale der Bewegungssimulation beschrieben.

3.2.2.1 Zahl der Freiheitsgrade

Als Freiheitsgrad eines Bewegungssystems wird im Folgenden die Möglichkeit eines Simulators bezeichnet, das Fahrzeug-Mockup oder eine Komponente davon mit einer durch das Fahrdynamikmodell berechneten translatorischen oder rotatorischen Bewegung in einer Raumrichtung zu beaufschlagen. Elemente zur Erzeugung vertikaler Schwingungen werden nur dann als Freiheitsgrad bezeichnet, wenn sie aus der Unebenheit der Straßenoberfläche berechnet werden, und nicht als statistisch erzeugtes Signal ausgeführt sind. Es sind Simulatoren mit 0 bis 10 Freiheitsgraden bekannt. Ist ein Freiheitsgrad redundant belegt, so werden beide Einrichtung als eigener Freiheitsgrad gezählt, wenn sie unabhängig von einander anzusteuern sind. Sind zwei Freiheitsgrade nicht unabhängig voneinander anzusteuern, spricht man auch von halben Freiheitsgraden. Im Anhang sind 9 typische Ausführungsbeispiele von Bewegungssystemen mit zwischen 3 und 10 Freiheitsgraden dargestellt.

Charakteristische Ausführungen sind Fixed-Base Simulatoren (0 Freiheitsgrade), Simulatoren mit Stewart-Plattform (6 Freiheitsgrade) und Simulatoren mit Stewart-Plattform und einem oder zwei translatorischen Schienensystemen, wie in Abbildung 3-16 dargestellt. Da für einen beliebigen Körper im Raum 6 Freiheitsgrade gegenüber seiner Umgebung möglich sind, wird die so genannte Stewart-Plattform mit 6 unabhängigen Freiheitsgraden auch als Standard-Bewegungssystem bezeichnet. Die Ausführung der Konstruktion ist aufgrund ihrer Symmetrie

sehr steif und ermöglicht mit 6 baugleichen Aktuatoren die Erzeugung unabhängiger Bewegungen ohne ausgeprägte Leistungsunterschiede zwischen den 6 Raumrichtungen.

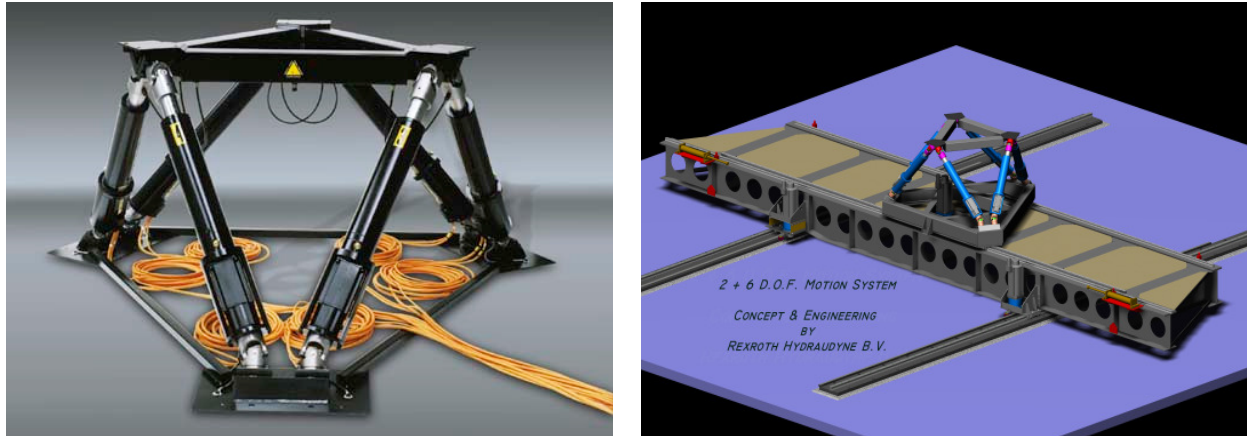


Abbildung 3-16: 6 DOF Standard- Bewegungssystem und 8-DOF Bewegungssystem (Standard-BWS und zwei translatorische Freiheitsgraden mit großem Verfahrweg, Rexroth Hydraudyne)

3.2.2.2 Bewegungsumfang, Beschleunigungen und Frequenzen

Die Leistungsfähigkeit eines Bewegungssystems wird durch die maximal möglichen, nicht simultanen Verfahrwege in Richtung der einzelnen Freiheitsgrade, die möglichen Verfahrgeschwindigkeiten, die Beschleunigungen und den darstellbaren Frequenzbereich beschreiben. In Tabelle 3-2 sind die bei Normalfahrt und sportlicher Fahrt in einem PKW auftretenden Wertebereiche für Bahn- und Aufbaubewegungen und deren Frequenzbereiche zusammengetragen und der entsprechende Freiheitsgrad des Bewegungssystems aufgeführt. Der Maximalwert der bei der Realfahrt auftretenden Frequenzen bestimmt die erforderlichen Verfahrgeschwindigkeiten des Bewegungssystems. Bei niederfrequenten Fahrmanövern müssen die Beschleunigungen ggf. sehr lange aufrechterhalten werden, sodass die Angabe eines unteren Grenzwerts der Frequenz nicht sinnvoll möglich ist. Auch Bewegungssysteme mit großen translatorischen Verfahrwegen können dieses Spektrum nicht vollständig ohne Skalierungsfaktoren abbilden. Dieser Umstand stellt das größte, derzeit noch ungelöste Problem bei der Beschleunigungssimulation dar. [86]

Bewegungsgrößen	Frequenz	Wertebereich	Darstellungsmöglichkeit durch Bewegungssysteme
Bahnbewegungen: Die Bewegung eines fahrzeugfesten, horizontalen KOS* gegenüber einem inertialen KOS, also die Bewegung des Fahrzeugs im Sinne des Sollkurses und der Sollgeschwindigkeit.			
Beschleunigung x-Richtung	<1,5 Hz	-2,5 bis +2,5 m/s ² (-8 bis +4 m/s ²)	Translation x-Richtung
			Neigungssimulation um y-Achse
Beschleunigung y-Richtung	<1,5 Hz	6 bis +6 m/s ² (-9 bis +9 m/s ²)	Translation y-Richtung
			Neigungssimulation um x-Achse

Bewegungsgrößen	Frequenz	Wertebereich	Darstellungsmöglichkeit durch Bewegungssysteme
Giergeschwindigkeit	<1,5 Hz	<4,5 °/s (<17 °/s)	Rotation um z-Achse
Bewegungsgrößen	Frequenz	Wertebereich	Darstellungsmöglichkeit durch Bewegungssysteme
Aufbaubewegungen: Die Bewegung eines karosseriefesten KOS gegenüber einem fahrzeugfesten, horizontalen KOS, also den Bewegungen des Fahrzeugaufbaus.			
Wanken	<1,5 Hz	<10 °	Rotation um x-Achse
Nicken	<1,5 Hz	<10 °	Rotation um y-Achse
Huben	<30Hz (<100Hz **)	±150 mm (±20 mm bei >30Hz**)	Translation z-Richtung

Tabelle 3-2: Bewegungsgrößen des Fahrzeugs mit Wertebereichen für PKW Normalfahrt (sportliche Fahrt)

*) KOS: Koordinatensystem, **) Komfort- und NVH-Untersuchungen [74, 102]

Die Angaben in der Tabelle gehen von der Unterscheidung zwischen fahrerinduzierten Schwingungen mit Frequenzen von bis zu 1,5 Hz und geschwindigkeitsabhängigen, fahrbahninduzierten Schwingungen aus. Für letztere werden 30Hz als maximale, fahrwerksrelevante Frequenz angegeben [74]. Höhere Frequenzen treten im Fahrzeug auf, haben aber nur sehr kleine Amplituden. Sie werden im Simulator meist durch Tieffrequenzlautsprecher oder Körperschallwandler dargestellt. Betrachtet man die auf den Fahrer einwirkenden Bewegungen und vergleicht dies mit den Möglichkeiten der Bewegungssimulation, so können vier signifikante Ausführungsstufen abgeleitet werden:

- *Aufbaubewegungen:* Nick-, Wank- und Hubbewegungen können auch von kleinen Bewegungssystemen ohne Einschränkungen nachgebildet werden, wenn sie die erforderlichen drei Freiheitsgrade unabhängig darstellen können. Die erforderlichen Verfahrswege sind gering und das Integral über die Verfahrswege auch in kurzen Zeitintervallen immer Null. Die aus der Fahrdynamik resultierenden Frequenzen sind für moderne elektrische und hydraulische Antriebe unproblematisch. Bahnbewegungen werden nicht dargestellt. Im FTM-Simulator wurden gute Erfahrungen hinsichtlich der Verträglichkeit der Bewegungssimulation erzielt, indem nur die Aufbaubewegungen Eingang in die Bewegungssimulation finden. Bahnbewegungen werden dagegen nicht berücksichtigt. Die Darstellung der drei Aufbaubewegungen ist demnach die erste signifikante Verbesserung erbringende Ausbaustufe eines Bewegungssystems mit mehreren Freiheitsgraden [75, 94]
- *Aufbaubewegungen und Bahnbewegungsinformation auf Stabilisierungsniveau.* Die Wahrnehmung translatorischer Beschleunigung verbessert auch bei kurzer Einwirkdauer deutlich die Güte der Spurhaltung. Die bei der Geradeausfahrt und auch der Kurvenfahrt auftretenden Frequenzen der Lenkbewegung zur Stabilisierung um die Nulllage bewegen sich im Bereich bis 1,5 Hz. Die dafür erforderlichen Verfahrswege können auch von kleineren Standard-Bewegungssystemen dargestellt werden. Die Information kann skaliert

werden, sofern nicht das Lenk-/ Fahrverhalten um die Nulllage Gegenstand der Untersuchungen ist [81, 94]

- *Aufbaubewegung und Bahnbewegungsinformation auf hochfrequentem Fahrdynamikniveau:* Große Standard- Bewegungssysteme mit Verfahrwegen ab ca. $\pm 1,5\text{m}$ in den horizontalen Bewegungsrichtungen können neben der Unterstützung der Lenkstabilisierung auch einen positiven Beitrag bei der Darstellung hochfrequenter Fahrmanöver (Slalom, Ausweichmanöver) erbringen. Die Frequenzen dieser Fahrmanöver liegen wie die der Stabilisierungsbewegungen bei bis zu 1,5Hz, erfordern aber eine längere Aufrechterhaltung der Bewegung. Die Rückföhrbewegung kann dann mit der Rückföhrung der Aufbaubewegung kaschiert werden, sodass nicht zwangsläufig eine qualitativ falsche Bewegung entsteht [40, 49].
- *Aufbaubewegungen und länger dauernde Bahnbewegungsinformationen:* Dieser Anspruch erfordert kombinierte Bewegungssysteme mit Standard-Bewegungssystem und Verfahrssystemen für zwei translatorische Freiheitsgrade. Um den zur Verfügung stehenden Verfahrweg für beide Freiheitsgrade nach Bedarf nutzen zu können, kann das Fahrzeug-Mockup auf einer Drehvorrichtung installiert sein. Dieses Prinzip kann zu einer starken Überhöhung der Gierrate föhren und erfordert zudem ggf. einen Invest, der den des restlichen Simulators erheblich übersteigt [41, 93, 96]

Im Folgenden werden ergänzende Informationen für die Auslegung von Bewegungssystemen gegeben.

Gierwinkel

Die Simulation der Gierwinkel durch Standard Bewegungssysteme ist nur mit Einschränkungen und der unterschwelliger Rückföhrungsbewegung möglich. Gierwinkelgeschwindigkeiten erreichen im Realfahrzeug außer beim Abbiegen nur in seltenen Fällen, wie z.B. auf kurvigen Strecken, die Merkschwelle. Sie liegen daher außerhalb des Erfahrungsbereichs durchschnittlicher Autofahrer und sind somit für die Darstellung in der Simulation sekundär, zumal die Information optisch unverfälscht dargeboten wird [98]. Dieses Missverhältnis zwischen optischer und vestibulärer Wahrnehmung muss allerdings hinsichtlich der Simulatorkrankheit kritisch bewertet werden.

Translatorische Verfahrvorrichtungen:

Die translatorische Querbewegung ist in der Praxis durch die Fahrbahnbreite begrenzt und bewegt sich im Bereich mehrerer Meter. Durch den notwendigen Vorhalt für den Washout ist die Anforderung an ein querdynamisches Bewegungssystem etwa um den Faktor 2 gegenüber der Realität erhöht, wenn der zukünftige Verlauf der Fahrbahn in der Datenbasis nicht zur Berechnung der Bewegungen herangezogen wird. Translatorische Längsbewegungen sind in der Realität nicht eingeschränkt und daher mit translatorischen Bewegungsvorrichtungen nicht uneingeschränkt darstellbar. Gleiches gilt für die, bei Kurvenfahrt auftretenden, lang andauernden Querbeschleunigungen. Geht der tatsächliche Bedarf an Verfahrweg über den verfügbaren hinaus,

wird in der Regel versucht, mit den Methoden Skalierung, Neigungs- oder Fliehkräftsimulation eine Verbesserung zu erzielen. Obwohl eine physikalische Verbesserung der Beschleunigungsdarstellung in x und y Richtung gelingt, erhöht sich die Gefahr der Kinetose, durch merkbare Neigungsbewegungen bzw. die Überhöhung der Giergeschwindigkeit, welche das beim Fahrer eingeprägte Wahrnehmungsgefüge aus translatorischen und rotatorischen Bewegungseindrücken verzerren. [41, 93]

Standard-Bewegungssystem

Bei der Auslegung der Verfahwege einer Stewart-Plattform ist zu berücksichtigen, dass Bewegungssysteme vom Fahrdynamikmodell mit Beschleunigungen beaufschlagt werden, da diese die physikalisch wahrnehmbare Größe darstellen. Maßgebend für die Verbesserung der translatorischen Hinweisreize sind demnach nicht die Verfahwege, sondern die Zeitdauer, über die hinweg eine Beschleunigung aufrecht erhalten werden kann. Da die Größe eines Standard-Bewegungssystems stark Kosten bestimmend ist, soll der Nutzen höherer Verfahwege durch den in Abbildung 3-17 gezeigten Zusammenhang verdeutlicht werden.

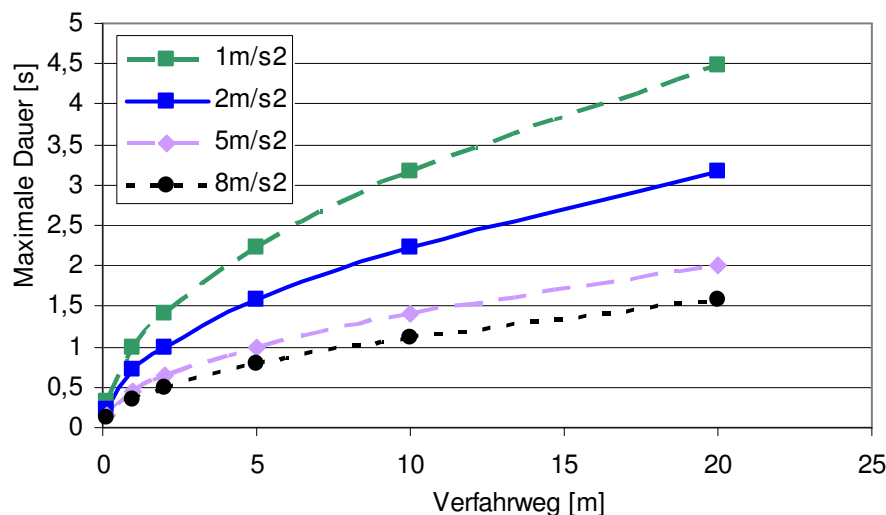


Abbildung 3-17: Rechenbeispiel: Verfahrweg und maximale Einwirkdauer bei rein translatorischer Bewegung

Abbildung 3-17 zeigt für verschiedene nominelle Beschleunigungen, wie mit dem Verfahrweg die maximale Dauer ($t = \sqrt{2s/a}$) ansteigt, über die hinweg eine Beschleunigung aufrechterhalten werden kann. Für das Motion-Cueing liegt die vereinfachte Annahme zu Grunde, dass spätestens bei 50% des Verfahrweges die Beschleunigung umgekehrt und die Verfahrgeschwindigkeit reduziert werden muss. Der Nutzen einer Vergrößerung des Verfahrweges wächst demnach unterproportional, während die Kosten stark überproportional ansteigen. Große Standard-Bewegungssysteme sollten daher nur realisiert werden, wenn hochfrequente Fahrdynamikmanöver als Anwendung geplant sind.

3.2.2.3 Fahrdynamikmodell und Reifenmodell

Das Fahrdynamikmodell ist ein echtzeitfähiges Rechenmodell, welches aus den Eingaben des Fahrers den Betriebs- und Fahrzustand des Fahrzeugs berechnet (s. Abbildung 3-18). Der Begriff Fahrdynamikmodell wird meist vereinfachend für mehrere Teilmodelle verwendet, welche die Quer- und Längsdynamik bestimmen. Um das querdynamische Verhalten zu berechnen, wird das eigentliche Fahrzeugmodell mit einem Modell des Reifenverhaltens und der Lenkung vervollständigt [87].

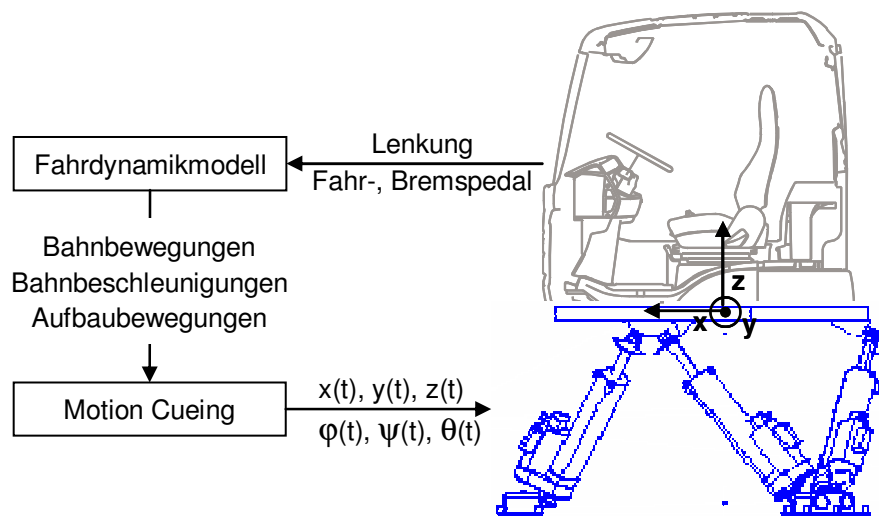


Abbildung 3-18: Fahrereingaben, Fahrdynamiksimulation und Motion-Cueing

Zur Bestimmung der Längsdynamik ist ein Modell des Antriebsstrangs und der Bremsen erforderlich. Die so berechneten Bewegungsgrößen bilden wiederum die Eingangsgrößen für die Bewegungssimulation. Sie beinhalten die Bahn- und Aufbaubewegungen als Führungsgrößen für die Bewegungssimulation. Die Anpassung dieser Führungsgrößen an den verfügbaren Bewegungsumfang und das Frequenzspektrum des Bewegungssystems durch Skalierung und Filterung wird als Motion-Cueing bezeichnet. Für die Details der vielfältigen Möglichkeiten, das Motion-Cueing abzustimmen, wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen [5, 49, 66, 67, 104].

Fahrdynamikmodell

Aus fahrzeugtechnischer Sicht kann zwischen Einspur- und Zweispurmodellen unterschieden werden. Mehrkörpersystem-Modelle (MKS-Modelle) sind eine weiterentwickelte Form von Zweispurmodellen, deren Modellierung sich stärker an der physischen Realität des Realfahrzeugs orientiert. Die Anzahl der Freiheitsgrade ist ein Hauptmerkmal eines Fahrdynamikmodells und bestimmt maßgeblich dessen Komplexität und den erforderlichen Rechenaufwand.

Einspurmodelle berechnen durch einfache kinematische Zusammenhänge den Bahnradius ausgehend vom Lenkeinschlag und besitzen mindestens 3 Freiheitsgrade. Für ein Zweispurmodell mit gefedertem Aufbau sind grundsätzlich 6 Freiheitsgrade für die gefederte Masse des Fahrzeugaufbaus und jeweils ein Freiheitsgrad für die Hubbewegungen der Räder anzusetzen.

Zusätzlich verlangen die meisten halb-empirischen Reifenmodelle einen Freiheitsgrad für die Rotation der Räder. Wenn halb-empirische Reifenmodelle verwendet werden, ist es sinnvoll, einen weiteren Freiheitsgrad für die Lenkungs kinematik anzusetzen [43]. Für Nutzfahrzeuge mit dem Fahrerhaus als zweite gefederte Masse und einem Auflieger oder Anhänger sind zusätzliche Freiheitsgrade erforderlich. Erst mit einem Zweispurmodell können fahrdynamisch bedingte Achs- und Radlastveränderungen berechnet und so die fahrdynamischen Effekte des Über- oder Untersteuerns dargestellt werden. MKS-Modelle stellen detailliert die Achskinematik mittels Lenkern und Lagerstellen dar, sodass die Effekte von Achs- und Radlastverlagerungen und die resultierenden Aufbaubewegungen realitätsnäher berechnet werden können. Die Nachbildung der realen Fahrwerkskinematik ermöglicht die einfache Variation von Fahrwerksparametern, wie dem Reifensturz oder der Spurbreite [88].

Damit die Berechnung der Fahrzeugposition und –geschwindigkeit nicht hinter der Frequenz der Bilderzeugung zurücksteht, sind für diese Modelle Taktraten von mindestens 100Hz anzustreben. Bekannt sind auch Modelle mit 200Hz. Die Modellierung von Fahrzeugdynamikmodellen und die zu Grunde liegenden physikalischen Zusammenhänge sind sehr ausführlich in der Literatur beschrieben [2, 84, 85, 87].

Reifenmodell

Im Folgenden werden die wichtigsten Ausführungsmöglichkeiten mit den charakteristischen und für die Fahrsimulation entscheidenden Eigenschaften erläutert.

Die einfachste Möglichkeit der Reifenmodellierung ist die Berechnung der Quer- und Längskräfte im Reifenlatsch auf der Basis von hinterlegten, empirischen Kennlinien. Diese Form der Modellierung erlaubt eine erste Darstellung der Bahnbewegungen des Fahrzeugs, berücksichtigt aber nicht die Abhängigkeit von Quer- und Längskräften, z.B. bei Lenk-Bremsmanövern. Da der Effekt der Reifensättigung nicht berücksichtigt wird, ist das fahrdynamische Verhalten bei hohen Kräften im Reifenlatsch unrealistisch. Dieses Verhalten wird verbessert, indem die Abhängigkeit der Längs- und Querkräfte (Kamm'scher Kreis) in der Berechnung berücksichtigt wird.

Halb-empirische Reifenmodelle, wie z.B. Pacejka oder Mc-Henry, bilden den Effekt der Reifensättigung detaillierter ab, sodass auch der Einfluss der Quer- und Längskräfte auf das Lenkmoment realitätsnah modelliert werden kann [43]. Halb-empirische Reifenmodelle erfordern eine lokal ebene Fahrbahn in der Reifenaufstandsfläche. Die Berechnung der Vertikaldynamik aus Straßenunebenheiten ist daher mit diesen Modellen nicht möglich. Nur wenn der Reifen als 3-dimensionales Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) aufgebaut ist, kann auch die Interaktion des Reifens mit einer lokal unebenen Fahrbahn simuliert werden. Erst dann ist es möglich, die in der Datenbasis mittels Polygonen modellierten Fahrbahnunebenheiten für die Berechnung der vertikalen Anregung des Fahrzeugaufbaus zu verwenden.

3.2.2.4 Typische Ausführungen von Bewegungssimulation und Fahrdynamik

In Tabelle 3-3 sind die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Ausbaustufen von Bewegungssystemen zusammengestellt. Ausbaustufe K1 (vertikale Schwingungen bis 30Hz) kann mit allen andern Stufen kombiniert werden.

Gruppe	Nr.	Ausführung
Hardware		
< 6 DOF, ohne Standard BWS	K1	1 DOF (translatorisch) <ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeitsabhängige, vertikale Schwingungen • Frequenz: bis 30Hz • Auslenkung: 20-50mm
	K2	3 DOF, (1 translatorisch, 2 rotatorisch) <ul style="list-style-type: none"> • Nur Aufbaubewegungen • Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: $\pm 10^\circ$
	K3	3 DOF, (1 translatorisch, 2 rotatorisch) <ul style="list-style-type: none"> • Aufbaubewegungen und Neigungssimulation • Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: $\pm 25^\circ$
6 DOF, Standard BWS	L1	6 DOF, Fixed-Screen <ul style="list-style-type: none"> • Typischerweise Standard-Bewegungssystem mit Nutzlast $\leq 1,5to$, Bewegungssystem trägt nur Mockup, nur Aufbaubewegung • Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: $\pm 25^\circ$
	L2	6 DOF, Fixed-Screen, hochfrequent <ul style="list-style-type: none"> • Sonderfall Schwingungs- und Komfortuntersuchungen, hochdynamisches Standard-Bewegungssystem, mehrachsige Schwingungen • Frequenz: bis 30Hz • Auslenkung: 20-50mm
	L3	6 DOF, Flying-Screen, geringer Augabstand <ul style="list-style-type: none"> • Typischerweise Standard-Bewegungssystem mit Nutzlast $< 2,5to$, Projektionssystem mit geringem Augabstand auf Bewegungssystem • Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: keine Angabe typischer Werte möglich
	L4	6 DOF, Flying-Screen, Augabstand $> 2,5m$ <ul style="list-style-type: none"> • Typischerweise Standard-Bewegungssystem mit Nutzlast $> 2,5to$, Neigungssimulation und Akkomodation möglich • Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: keine Angabe typischer Werte möglich
> 6 DOF, mit Standard BWS	M1	7 DOF (Standard-BWS, 1 DOF translatorisch mit großem Verfahrensweg) <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Beschleunigungsdarstellung in einer Richtung • Transl. DOF: Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: mehrere Meter

Gruppe	Nr.	Ausführung
> 6 DOF, mit Standard BWS	M2	8 DOF (Standard-BWS, 2 DOF translatorisch mit großem Verfahrweg) <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte Beschleunigungsdarstellung in zwei Richtungen • Transl. DOF: Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: mehrere Meter
	M3	9 DOF (Standard-BWS, 2 DOF translatorisch mit großem Verfahrweg, 1 DOF rotatorisch) <ul style="list-style-type: none"> • Rotatorischer Freiheitsgrad des Projektionsdoms gegenüber dem Standard-BWS • Für translatorischen DOF: Frequenz: bis 1,5Hz • Auslenkung: mehrere Meter • Rotatoischer DOF: unbegrenzt
Software		
Fahrdynamikmodell	N1	Einspurmodell: Nur Bahnbewegungen
	N2	Zweispurmodell: Aufbaubewegungen, Achs- und Radlastveränderungen und damit Darstellung von Unter- und Übersteuern möglich
	N3	MKS-Modell: Variation von Fahrwerksabstimmung, Fahrwerksgeometrie und Aufbaueigenschaften möglich
Reifenmodell	O1	Ohne kombinierte Quer-/Längsdynamik
	O2	Kombinierte Quer-/Längsdynamik
	O3	Halb-empirische Reifenmodelle (z.B. Pacejka, Mc-Henry)
	O4	3D-Finite-Elemente-Reifenmodell

Tabelle 3-3: Typische Ausführungen von Bewegungssimulation, Fahrdynamik- und Reifenmodell [43, 102]

3.2.3 Geräuschsimulation

Über die Ausführungen und Merkmale der Geräuschsimulation in Fahrsimulatoren gibt es viele Veröffentlichungen, wobei der Beitrag zur Gesamtsimulation meist nur am Rand behandelt wird [10, 25, 45, 102]. Obwohl nicht zwingend für die primäre Fahraufgabe erforderlich, liefern Geräusche eine große Informationsmenge, welche durch die Ergänzung der Gesamtwahrnehmung dazu beiträgt, das Regelverhalten und vor allem das Präsenzepfinden zu verbessern. Neben der Darstellung der fahrzustandsabhängigen Geräusche geschieht dies durch die vielfältigen Stand- und Nebengeräusche, die der Fahrer mit der Fahrt im Kraftfahrzeug in Verbindung bringt.

Es kann unterschieden werden zwischen Geräuschen, die mit der primären bzw. der sekundären und tertiären Fahraufgabe in Verbindung stehen. Für die Lokalisation der Geräusche ist zudem relevant, ob diese fahrzeuggebunden sind oder aus der Fahrumgebung stammen. Die darzustellenden Geräusche sind in Tabelle 3-4 im Einzelnen aufgelistet. Im Folgenden sind die zur Wiedergabe erforderlichen Eigenschaften der Hardware beschrieben.

Ausgabegeräte und Frequenzbänder

In der Realfahrt wird durch Motor und Fahrbahn ein breites Spektrum an hör- und fühlbaren Frequenzen erzeugt. Diese Geräusche und Schwingungen liefern einen sehr guten Beitrag zur

Wahrnehmung der Fahrgeschwindigkeit und des Fahrzustands. Das Auflösungsvermögen des Gehörs hinsichtlich der Frequenzzusammensetzung eines Geräusches ist sehr hoch. Die in der Simulation verwendeten Geräusche sollten daher unbedingt mit akustisch hochwertigen Geräten am Originalfahrzeug aufgenommen werden. Einzelne Geräusche minderer Qualität sind dem Fahrer aus dem Fahrbetrieb nicht intuitiv bekannt und können den Gesamteindruck und damit die Güte der Simulation erheblich stören.

Es ist nicht sinnvoll, hier konkrete Anforderungen an den erforderlichen darstellbaren Frequenzbereich und das Übertragungsverhalten zu benennen, da diese von den konkret verwendeten Geräuschen und den darin enthaltenen Frequenzen abhängen. Wenn die Anwendung beispielsweise erfordert, Reifen- oder Bremsenquietschen darzustellen, ergeben sich erheblich höhere Anforderungen an den Frequenzbereich der Lautsprecher und entsprechend höhere Kosten. Um für eine hochwertige Geräuschsimulation sicherzustellen, dass die gesamte Kette der Schallerzeugung für die Übertragung und Wiedergabe der Frequenzinhalte geeignet ist, ist eine Frequenzanalyse der verwendeten Geräusche unerlässlich. Darauf aufbauend erfolgt die Wahl des Komprimierungsformats der digitalen Aufnahme, der PC-Soundkarten, der Equalizer, der Verstärker und der Lautsprecher.

Tiefe Frequenzen und fahrbahninduzierte Schwingungen

Ohne fahrbahninduzierte Schwingungen entsteht beim Probanden der Eindruck des Schwebens über einer völlig ebenen Fahrbahnoberfläche, was nicht den Erfahrungen aus der Realfahrt entspricht und den Geschwindigkeitseindruck stark verfälscht. Es ist möglich, diese Frequenzen mittels des Hauptbewegungssystems, eines Hydropuls-Zylinders oder durch Körperschallwandler und Subwoofer auszugeben. Um neben den höherfrequenten Geräuschen wahrgenommen zu werden, erfordert die Darstellung sehr tiefer, hörbarer Frequenzen (>ca. 20Hz) durch einen Subwoofer meist große Pegel. Nach den Erfahrungen am FTM-Simulator kann es dann zu unangenehmen Resonanzschwingungen der akustisch aktiven Flächen des Fahrzeugs kommen. Schwingungen, welche nicht mehr vom Hauptbewegungssystem abgedeckt werden, sollten daher durch einen Körperschallwandler am Fahrersitz erzeugt werden. Durch das Hauptbewegungssystem erzeugte Schwingungen von mehr als 4Hz wurden am FTM-Simulator als unangenehm empfunden. Die Frequenzzuweisungen zwischen Bewegungssystem, Körperschallwandler und Lautsprechern können sich überlappen und sind für den Einzelfall subjektiv abzustimmen. Um Geräusche in Ihrer Frequenzzusammensetzung und ihrer Gewichtung an die Gegebenheiten des Fahrzeuginnenraums anzupassen, sind neben regelbaren Verstärkern unbedingt Equalizer mit Hochpass-, Tiefpass- und Bandfilterfunktion vorzusehen.

Lokalisation und Verteilung der Geräusche

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal der Geräuschsimulation ist die Möglichkeit, Geräusche dort wiederzugeben, wo sie auch im Originalfahrzeug lokalisiert sind [10]. Eine Ausnahme bilden die schlecht lokalisierbaren sehr tiefen und sehr hohen Frequenzen (s. Kapitel 2.2.2). Bei der Platzierung der Lautsprecher ist darauf zu achten, dass die wiedergegebenen Geräusche keine

Verringerung des Pegels oder eine Tiefpassfilterung, z.B. durch Dämmmaterial, erfahren. Wenn externe Schallquellen, wie z.B. entgegenkommende oder überholende Fahrzeuge, sich gegenüber dem Ego-Fahrzeug bewegen, ist der Einfluss der Entfernung durch Variation der Lautstärke und idealerweise auch der Einfluss der Geschwindigkeit durch die Variation der Frequenz (Dopplereffekt) darzustellen. Es sind Systeme im Markt, die zusätzlich aus dem einkanaligen Quellsignal des Fremdfahrzeuggeräusches ein binaurales Stereosignal erzeugen und damit einen Beitrag zur Lokalisation externer Objekte liefern [45]. Dabei wird das Geräusch mit variierender Intensität auf mehreren Lautsprechern abgespielt. Um diese Eigenschaften zu realisieren, sind mindestens vier Lautsprecher im Fahrzeuginnenraum erforderlich.

In Tabelle 3-4 sind die Geräuschinhalte und die Merkmale der Hardware beschreiben.

Merkmal	Nr.	Ausführung
Software		
Geräusche der primären Fahraufgabe	P1	Primär, fahrzeuggebunden: <ul style="list-style-type: none"> • Motorengeräusch: Drehzahlabhängig, lastabhängig • Reifen-/ Abrollgeräusch kontinuierlich, geschwindigkeitsabhängig, abhängig von der Seitenkraft (Reifenquietschen) • Fahrbahninduzierte Schwingungen: kontinuierlich, geschwindigkeitsabhängig • Windgeräusch: kontinuierlich, geschwindigkeitsabhängig
	P2	Primär, Umwelt: <ul style="list-style-type: none"> • Diskontinuierliche Geräusche: Schallreflexionen an Leitplanken, Bäumen, Überfahren von Schienen/Bodennebenheiten etc.
Geräusche der sekundären und tertiären Fahraufgabe	Q1	Sekundär/tertiär, fahrzeuggebunden: <ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Geräuschkulisse aus dem Originalfahrzeug: Anlassergeräusch, Blinkerrelais, Luftdruckbremse (LKW), Getriebe-/ Schaltgeräusche, etc.
	Q2	Sekundär/tertiär Umwelt: <ul style="list-style-type: none"> • Autonome Verkehr: Lautstärke entfernungsabhängig, Lautstärke und Frequenz abhängig von Differenzgeschwindigkeit (Dopplereffekt)
Hardware		
Konzept und Geräte	R1	Zweikanalton: Standard-Stereo-Verstärker mit Equalizer, 2 Lautsprecher, keine Lokalisation
	R2	Mehrkanalton (≥ 4 Kanäle): Mehrkanal-Mono-Verstärker, Mehrkanal-Equalizer, Mischpult. Lokal verteilte Ausgabe
	R3	Körperschallwandler: Darstellung von Schwingungen zwischen ca. 4-100Hz ohne hohen Schalldruck

Tabelle 3-4: Typische Ausführungen der Geräuschsimulation

3.2.4 Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Ausführung des Fahrzeug-Mockups hat einerseits Auswirkungen auf das Präsenzepfinden und bestimmt andererseits das Spektrum der möglichen Anwendungen mit. Das Präsenz-

empfinden verbessert sich, je mehr das Mockup dem Realfahrzeug ähnelt. Es kann zwischen einem abstrahierten Fahrstand, einem Teilfahrzeug und einem Vollfahrzeug (Abbildung 3-19) unterschieden werden. Während im Fahrstand nur ein Sitz und der zu untersuchende Teil der Mensch-Maschine-Schnittstelle verbaut ist, kann der Fahrer beim Vollfahrzeug keine durch das Simulatorkonzept bedingten Modifikationen beim Fahren erkennen. Teilfahrzeuge haben Bestandteile des Realfahrzeugs, die Modifikationen sind aber für den Probanden auch während der Fahrt ersichtlich. Um das Präsenzepfinden schon beim Einsteigen nicht zu stören, ist bei einigen Simulatoren ein auch äußerlich serienmäßiges Fahrzeug mit Rädern und vollständiger Karosserie montiert. In Zusammenhang mit der Bewegungssimulation sind bei der Auswahl des Mockups die Aspekte des Bewegungsumfangs, der Schwingungsfestigkeit und der Nutzlast zu beachten. Insbesondere bei Simulatoren, welche zur Fahrzeugentwicklung dienen, wird auch Wert darauf gelegt, das Mockup austauschen zu können. [55, 102]



Abbildung 3-19: Ausführung des Mockups als Fahrstand (links), Teilfahrzeug (rechts) [KMW]

Die Ausprägung der Mensch-Maschine-Schnittstelle entscheidet über die Aufgaben, die der Proband bearbeiten kann. Für Untersuchungen zur Regelleistung des Fahrers und zum Fähigkeitserwerb kann ein Fahrstand mit den primären Bedienelementen und den korrespondierenden Anzeigen ausreichend sein. Variationen resultieren dann aus Veränderungen am Fahrer oder an der gestellten Fahrsituation. Sind zudem sekundäre Bedienelemente wie Blinker, Lichtschalter oder beispielsweise Fahrgeschwindigkeitsregler verbaut, nähert sich die Beanspruchung qualitativ und quantitativ an die Realfahrt an. Mit dieser Ausbaustufe können Varianten der verbauten Mensch-Maschine-Schnittstelle auf Ergonomie und Funktionalität getestet werden. Die Ausstattung mit sekundären Bedienelementen ermöglicht eine realitätsnähere Interaktion mit der Fahrzeugumgebung und anderen Verkehrsteilnehmern. Ist das Fahrzeug-Mockup mit tertiären Bedienelementen und –anzeigen ausgestattet, können diese entweder Untersuchungsgegenstand oder Mittel zur Erzeugung zusätzlicher Belastung bei der Untersuchung primärer und sekundärer Aspekte sein. Gerade beim Test von Anzeigen haben sich Virtual-Prototyping-Lösungen etabliert,

die die freie Programmierbarkeit des Kombiinstrumentes ermöglichen. Variantentests hinsichtlich Design, Farbgestaltung und Ergonomie können so ohne zusätzlichen Hardwareaufwand erfolgen.

Lenkung

Das am Lenkrad auftretende Moment resultiert aus den im Reifenlatsch herrschenden Kontaktkräften, der Lenkungs kinematik und der Lenkunterstützung. Alle herkömmlichen Lenksysteme in Realfahrzeugen liefern bei moderaten Lenkwinkelgeschwindigkeiten, konstanter Fahrgeschwindigkeit und konstanter Reibung in der Reifenaufstandsfläche ein zum Lenkwinkel proportionales Moment [98]. Zudem ist das Moment proportional zu den Querkräften im Reifenlatsch und damit zu den auftretenden Querschleunigungen. Dieser Zusammenhang ist bei kleinen Lenkwinkeln durch Hystereseeffekte leicht verzerrt, was in der Lenkkräftsimulation berücksichtigt werden kann. Das Lenkmoment vermittelt unmittelbare und sehr detaillierte Informationen über den momentanen Fahrzustand. Hinsichtlich der Funktionalität kann unterschieden werden, ob das berechnete Lenkmoment nur geschwindigkeits- und lenkwinkelabhängig ist oder ob tatsächlich die Kraftverhältnisse im Reifenlatsch das Lenkmoment beeinflussen. Dazu ist ein Modell des Rückstellmoments, der Lenkungs kinematik und der Lenkunterstützung erforderlich [48, 98]. Das Rückstellmoment ist eine Funktion der aus dem Reifenmodell berechneten Längs- und Querkräfte und der Lenkungs kinematik. Die Lenkungs kinematik wird repräsentiert durch vorwiegend lineare Zusammenhänge der Lenkgeometrie und des Lenkgetriebes. Hinzu kommt ggf. ein komplexeres Modell der Lenkunterstützung. [77, 102]

Das Lenkmoment wird mit der Hand wahrgenommen und liefert daher den Reiz für den sog. lokalen Haltere reflex der Extremitäten, der mit einer Reaktionszeit von ca. 0,02sec einen der schnellsten menschlichen Reflexe darstellt. Zusammen mit der hohen Kraftauflösung der Hand von 2 Prozent der Haltekraft und der sehr hohen vibrotaktilen Empfindlichkeit der Hand im Frequenzbereich bis ca. 1000Hz werden hohe Anforderungen an die Dynamik der Berechnung und der mechanischen Umsetzung des Lenkmoments gestellt. Die Berechnung und Einsteuerung des Handmoments muss im Bereich weniger Millisekunden erfolgen. Die Lenkmomentsimulation des FTM-Simulators arbeitet mit einer Frequenz von 200Hz.

Abbildung 3-20: Ausführungsbeispiel einer Lenkmoment-Simulation - Senso-Wheel SD 17C von Sensodrive, (Maximalmoment: 26Nm, Feinfühligkeit: 0,03Nm, Bandbreite 30Hz, Taktrate: 1000Hz)



Wenn durch die Lenkmoment-Simulation auch geschwindigkeitsabhängige Informationen, wie beispielsweise bremseninduzierte Lenkraddrehschwingungen oder fahrbahninduzierte, statistische Schwingungen dargestellt werden, sollte die Frequenz der Berechnung gemäß dem Nyquist-Shannonschen Abtasttheorem mindestens mit der doppelten Maximalfrequenz der darzustellenden Schwingungen arbeiten. Bekannt sind Ausführungen mit bis zu 2000Hz.

Zur Erzeugung eines Moments am Lenkrad sind einfache, rein mechanische Lösungen ebenso realisiert, wie aufwändig elektronisch gesteuerte oder geregelte Lenkmomentsimulationen (Abbildung 3-20). Üblich ist die Anwendung elektrischer Servomotoren, die direkt oder über ein Getriebe mit der Lenksäule verbunden sind. Für die Ansteuerung des Motors ist mindestens die Messung des Lenkwinkels erforderlich. Wird zwischen Servomotor und Lenkrad eine Übersetzung oder eine andere, nicht momentenneutrale Komponente verbaut (z.B. mechanische Reibungsdämpfung), ist die Messung und Rückführung des tatsächlichen lenkradseitigen Moments sinnvoll, um eine Regelung zu ermöglichen. Die Gleichmäßigkeit des Moments wird motorseitig durch das Rastmoment (Cogging-Torque) bestimmt, welches durch die magnetische Wechselwirkung zwischen Rotor und Stator entsteht. Diese Eigenschaft kann durch eine intelligente Regelung ausgeglichen oder durch eine hohe Übersetzung abgemildert werden. Außerdem besitzen bestimmte Motorkonstruktionen, wie z.B. Hohlwellenmotoren oder Scheibenläufermotoren, konzeptbedingt ein sehr geringes Rastmoment.

Hardware-in-the-Loop Lenkungen

Ein sehr aufwändiger Ansatz ist die Implementierung von echten Fahrzeuglenkungen im Sinne einer Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation. Funktional gesehen kann die Verwendung der Originallenkung nur in Verbindung mit einem kompletten HIL-Lenkungs-Prüfstand und den entsprechenden Fahrbahn- und Reifenmodellen empfohlen werden. Nur wenn das Lenkgetriebe und die Lenkungs kinematik mit ihren charakteristischen Elastizitäten verbaut sind, kann sich eine Verbesserung der Simulationsgüte ergeben. Folglich sind zwingend auch die hohen Spurstangenkräfte mechanisch nachzubilden. Wird dies nicht realisiert, ist der Einsatz von HIL-Lenkungen oder Lenkungs-komponenten an Fahrsimulatoren funktional und finanziell nicht sinnvoll.

Fahrpedal und Bremse

Da in den Serienfahrzeugen das elektronische Fahrpedal (E-Gas) Stand der Technik ist, kann die Nachbildung des Fahrpedal-Gefühls meist durch eine oder mehrere Metall- oder Luftfedern im Falle von pneumatischen Bremssystemen erfolgen. Auch beim Bremspedal kann durch die Kombination verschiedener Federn ein gutes Feedback erreicht werden. Je nach Art der Bremse im Originalfahrzeug bringt der Einsatz einer partiellen, passiven HIL-Komponente bestehend aus Hauptbremszylinder, Bremskraftverstärker, Bremsleitungen und Bremsscheibe das beste Realitätsempfinden, da hier die Elastizitäten und Nichtlinearitäten des echten hydraulischen Systems spürbar werden. Für die Darstellung der Rückwirkungen von Regelsystemen, wie z.B. ABS, sind schnelle aktive Stellelemente notwendig. [7, 13]

Sekundäre und tertiäre Mensch-Maschine-Schnittstelle

Diese Bedienelemente haben durch ihr Aussehen, ihre Haptik und ggf. durch ihre akustische Rückmeldung einen Einfluss auf das Präsenzepfinden. Einige sekundäre Bedienelemente und Anzeigen wie Blinker und Tachometer sind in ihrer Anordnung weitestgehend standardisiert, was in der Konzipierung des Fahrstandes berücksichtigt werden sollte. Dagegen bieten sich bei der Gestaltung und Anordnung der tertiären Bedienelemente viele Freiheitsgrade. Diese können auch in den Bereich der sekundären Anzeigen hineinreichen, wenn z.B. im Kombiinstrument situationsabhängig Informationen z.B. von Infotainment, Abstandstempomat und Motormanagement eingeblendet werden. Ist dies der Fall, kann die Verwendung eines virtuellen Kombiinstrumentes in Form eines programmierbaren Bildschirms empfohlen werden. Entsprechende Rapid-Prototyping Tools ermöglichen einen schnellen Variantenvergleich ohne Hardware-Umbau und Fertigungsaufwand. Die typischen Ausführungen sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst.

Merkmal	Nr.	Ausführung
Fahrzeug	S1	Fahrstand: Fahrersitz und Mensch-Maschine-Schnittstelle ohne Karosserie
	S2	Teilfahrzeug (Viertel- oder Halbfahrzeug): Modifikationen des Fahrzeugs während der Fahrt sichtbar
	S3	Vollfahrzeug: Modifikationen des Fahrzeugs während der Fahrt nicht sichtbar
	S4	Serienfahrzeug: Auch beim Einsteigen keine Modifikationen sichtbar
MMS	T1	Primäre Mensch-Maschine-Schnittstelle
	T2	Vollständige Mensch-Maschine-Schnittstelle
	T3	Vollständige MMS, konfigurierbare Anzeigen (Rapid-Prototyping-SW)
Lenkung	U1	Lenkmoment proportional zum Lenkwinkel: mech. Dämpfung und Reibung, Moment nicht geschwindigkeitsabhängig
	U2	Lenkmoment, Dämpfung und Reibung elektrisch: Handmoment durch Elektromotor erzeugt, Moment abhängig von Geschwindigkeit und Lenkwinkel
	U3	Lenkmoment schnell, Dämpfung und Reibung elektrisch: Wie U2, aber mit schneller Regelung (>200Hz), Darstellung von hochfrequenten fahrbahn- oder fahrzeuginduzierten Schwingungen
Fahrpedal und Bremse	V1	Krafterzeugung passiv
	V2	Krafterzeugung adaptiv: Kennlinien veränderbar
	V3	Krafterzeugung aktiv: Kennlinien veränderbar, Darstellung von Regeleingriffen wie ABS, etc. möglich

Tabelle 3-5: Typische Ausführungen von Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

3.2.5 Datenbasis und Verkehrssimulation

Datenbasis und Verkehrssimulation sind neben Bewegungs- und Sichtsystem oftmals die teuersten Einzelkomponenten eines Simulators. Als Datenbasis wird die virtuelle Repräsentation der

Umgebung bezeichnet, in der das simulierte Fahrzeug sich bewegt. Sie enthält typischerweise folgende Informationen [43]:

- Terrainbeschreibung: Die mit Dreiecken modellierte Form der Landschaftsoberfläche.
- Fahrbahnverlauf: Auf der ebenen Fahrbahnoberfläche ist der Straßenverlauf als Führungsgröße für die Regelungsaufgabe durch analytische Funktionen wie Klothoiden, Kreissegmente oder Geraden beschrieben.
- Fahrbahneigenschaften: Die Beschreibung der Eigenschaften der Fahrbahn durch Reibbeiwerte, statistische Unebenheiten etc..
- Modelle: Mittels Dreiecken modellierte Ausstattungsmerkmale der Datenbasis wie Häuser, Bäume, Straßenschilder, etc.
- Logische Informationen: Zusatzinformationen über die Ausstattungsmerkmale der Datenbasis, welche für das Verhalten des Ego-Fahrzeugs und der Verkehrssimulation relevant sind, wie z.B. Ampeln, Stoppschilder und Geschwindigkeitsbegrenzungen
- Texturen: Bilddaten, welche auf den Modellen platziert werden, um den Modellen ein realistisches Aussehen zu geben.

Für die Konzipierung ist zu unterscheiden zwischen funktionalen Aspekten und der Qualität der Ausführung. Die Funktion wird bestimmt durch die Flexibilität und Vielseitigkeit der Ausstattung mit Merkmalen, Fahrzeugen sowie einer flexiblen Bedieneroberfläche. Die hochwertige Ausführung der Modelle und Texturen hingegen verbessert zum einen das Präsenzepfinden und zum anderen die Regeltätigkeit durch einen realitätsnäheren Geschwindigkeits- und Entfernungseindruck. Da sich die funktionalen Anforderungen direkt aus der Anwendung erschließen, werden hier vorrangig die qualitativen Merkmale von Datenbasis und Verkehrssimulation beschreiben.

Arten von Datenbasen

Es sind drei Arten von Datenbasen bekannt. Die herkömmliche, statische Datenbasis besteht aus einem global konsistenten Straßennetz d. h. es kann eine einzige maßstabsgetreue Karte der gesamten Landschaft angefertigt werden. Eine modulare, statische Datenbasis wird vor der Übung aus vorgegebenen, statischen und lokal geometrisch konsistenten Modulen zusammengesetzt. Bei der dynamischen Datenbasis wird nicht ein Straßenverlauf vorgegeben, sondern eine Logik, welche Straßenstücke als Bestandteil von Umgebungsmodulen während der Simulation aneinanderreicht [59, 60]. Daraus resultiert ein vom Fahrerverhalten und ggf. auch von der Verkehrssituation abhängiger Straßenverlauf, der global geometrisch nicht konsistent sein muss. Bei den beiden modularen Ansätzen ergeben sich aufgrund der nicht zwangsläufig gegebenen geometrischen Konsistenz und der erforderlichen „Passung“ zwischen allen Modulen Einschränkungen hinsichtlich der Ausgestaltung der umgebenden Landschaft. So ist bei diesen beiden Typen eine weit reichende Sicht aufgrund der Modulararchitektur der Landschaft häufig problematisch. Dagegen ergeben sich durch diese Architektur Vorteile für bestimmte Anwendungen, wie z.B. Müdigkeitsuntersuchungen, die eine stundenlange Fahrt erfordern.

Inhalte und Ausstattung von Datenbasen

Die realitätsnahe Modellierung und Texturierung der Objekte der Datenbasis ist die Voraussetzung für eine gute Abstands- und Geschwindigkeitswahrnehmung. Aus den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung ergibt sich die Forderung nach einer perspektivisch richtigen Abbildung der Umwelt, um einen verfälschten Entfernungseindruck durch die sukzessive Parallaxe zu vermeiden. Darüber hinaus ist für eine zutreffende Abstandsschätzung auf die realitätsgetreue Skalierung der umgebenden Objekte zu achten. Bei frühen Datenbasen wurden z.B. Verkehrsschilder unrealistisch vergrößert, um bei der geringen verfügbaren Bildauflösung die Lesbarkeit zu verbessern. Eine Verschlechterung der Abstandseinschätzung ist die Folge. Die Oberflächen der Fahrumgebung werden meist durch relativ wenige Polygone erzeugt. Ein guter optischer Eindruck entsteht durch die Verwendung realistischer Texturen, die auf den Polygonen dargestellt werden. Ein glatter Quader kann durch eine oder mehrere Texturlagen den Eindruck einer strukturierten Hausfront vermitteln. Der begrenzende Faktor der für die gewünschte Bilderzeugungsrates möglichen Anzahl von Polygonen ist die Rechenleistung des Grafikprozessors [3, 43]. Das technisch Machbare hinsichtlich Rendering, Schattenwurf, Lichtreflexen etc. zeigen kommerzielle Fahrsimulationen für PCs oder Spielkonsolen (Abbildung 3-21).

Hinsichtlich der Ausstattung der Datenbasis kann unterschieden werden zwischen solchen, welche nur in der Nähe der Fahrbahn realistisch und merkmalsreich ausgestaltet sind, um durch die verbesserte Entfernungsabschätzung im Nahbereich die Stabilisierungsaufgabe zu unterstützen, und solchen, die auch in weiterer Entfernung der Fahrbahn realistisch und merkmalsreich ausgestaltet sind. Diese Merkmale im Fernbereich liefern vorrangig die Hinweisreize für die Bahnführungsaufgabe. Um die Randbedingungen der Fahraufgabe global verändern zu können, sollten Witterungsbedingungen, Helligkeit, Reibbeiwert etc. global während der Fahrt einstellbar sein. Die Möglichkeiten, eine Datenbasis mit passiven und aktiven Details auszustatten sind vielfältig und werden in der entsprechenden Literatur beschrieben. Der Bedarf ergibt sich direkt aus der geplanten Anwendung [3].



Abbildung 3-21: Ausschnitt aus der Fahrsimulator Datenbasis des FTM-Simulator und einem kommerziellen PC-Spiel (211)

Verkehrssimulation

Die Simulation des autonom fahrenden Verkehrs besteht in der Regel aus Fahrzeugen, welche außerhalb des Sichtbereichs des Fahrers automatisch in das Szenario eingesetzt und auch wieder entnommen werden, um eine bestimmte Verkehrsdichte zu erzeugen. Diese Fahrzeuge regeln mittels eines Fahrermodells ihren Kurs gemäß einem vordefinierten Regelsatz, der den geltenden Verkehrsregeln entsprechen kann [72]. Dieser regelbasierte Verkehr bietet nicht die Flexibilität, Situationen gezielt zu erzeugen. Dies wird erreicht durch Fahrzeuge, welche ereignisabhängig eingesetzt werden können. Beim Überfahren eines Auslösepunktes durch das Ego-Fahrzeug werden diese Fahrzeuge in das Szenario eingesetzt und verhalten sich entsprechend den vom Nutzer in einem Skript definierten Geschwindigkeits- und Wegvorgaben.

Merkmal	Nr.	Ausführung
Datenbasis		
Konzept der Datenbasis	W1	Statische Datenbasis: Global konsistentes, statisches Straßennetz
	W2	Modulare, statische Datenbasis: Vorgegebene statische Module, lokal geometrisch konsistent, offline konfigurierbar
	W3	Dynamische Datenbasis: Vorgegebene statische Module, global geometrisch nicht zwingend konsistent, variabel abhängig vom Fahrerverhalten,
Merkmale des Verkehrsraums	Y1	Merkmale fahrbahnnah
	Y2	Merkmale fahrbahnfern
	Y3	Merkmale veränderbar
Autonomer Verkehr (AV), Verkehrssimulation		
Umgebender Verkehr	Z1	Verkehrssimulation vorhanden: Verhalten nach den Verkehrsregeln, Einsetzen zufällig
	Z2	Verkehrssimulation global variierbar: <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsdichte des AV online variierbar von „kein Verkehr“ bis „Stau“ • Verhalten aller AV-Fahrzeuge global online/offline variierbar (z.B. Höchstgeschwindigkeit für alle Fahrzeuge bei Fahrt im Nebel)
Einzelfahrzeuge	AA1	Skriptgesteuerte Einzelfahrzeuge: <ul style="list-style-type: none"> • EGO-Triggerfunktion: Einsetzen von Fahrzeugen oder Ereignissen, wenn das Ego-Fahrzeug einen Auslösepunkt (Trigger) passiert • Spurverhalten: Vorgabe der Fahrspur ist möglich • Geschwindigkeitsverhalten: Vorgabe der Geschwindigkeit ist möglich • Verkehrssimulation-Triggerfunktion: Eingesetzte Fahrzeuge zeigen ab Triggerpunkt vorgegebenes Verhalten
	AA2	Sonder-AV: Radfahrer, Fußgänger, Tiere etc. getriggert einsetzbar
	AA3	Manuell gesteuertes Einzelfahrzeug: Manuell vom Versuchsleiter zu steuerndes Fahrzeug

Tabelle 3-6: Typische Ausführungen von Datenbasis und autonomem Verkehr

Einen Sonderfall stellen Fahrzeuge dar, die vom Versuchsleiter während der Übung manuell gesteuert werden können. Solche Fahrzeuge bieten die größtmögliche Flexibilität bei der Erzeugung von Fahrsituationen, welche allerdings durch die Verschlechterung der Reproduzierbarkeit erkauft wird. In Tabelle 3-6 sind die Merkmale einer Verkehrssimulation zusammengestellt, die aus der Literatur und von der FTM Verkehrssimulation bekannt sind. [19, 64, 72, 103].

3.2.6 *Integrale Qualität der Simulation*

Ein integrales Qualitätsmerkmal der Fahrsimulation ist die Häufigkeit des Auftretens der Simulatorkrankheit. Ein Überblick über die Ursachen und Auswirkungen der Simulatorkrankheit findet sich in [67, 100]. Nur wenn Probanden längere Zeit beschwerdefrei im Simulator fahren können, kann die Gesamtanlage als gelungen bezeichnet werden. Die Häufigkeit des Auftretens der Simulatorkrankheit hängt nicht mit dem geleisteten Invest zusammen, was darauf hinweist, dass neben der technischen Leistungsfähigkeit der Einzelkomponenten auch deren Konfiguration und harmonische Abstimmung von großer Bedeutung sind. Die Güte und Stimmigkeit der Reaktion des Simulators auf Fahrereingaben betrifft in erster Linie das Zusammenspiel von haptischen, vestibulären und optischen Sinneseindrücken unter den in Tabelle 3-7 beschriebenen Gesichtspunkten. Diese Kriterien sind bei jeder Fahrsimulation zu berücksichtigen.

Merkmal	Nr.	Ausführung
Zeitverzug	AC1	Hard- und Softwarekomponenten müssen in der Lage sein, die aus der Realität bekannten Zeitverzögerungen zwischen Fahrereingabe und Fahrzeugreaktion einzuhalten.
Zeitversatz	AC2	Die zeitliche Abfolge der Sinnesreize ist sehr stark in die menschliche Erfahrung eingepreist. Sie ist daher sehr wichtig für eine beschwerdefreie Fahrt im Simulator [27]
Gleichmäßige Verstärkung	AC3	Für Untersuchungsgegenstände wie z.B. querdynamische Manöver, kann es vorteilhaft sein, einen Kanal der Simulation quantitativ stark zu verbessern, indem ein zusätzlicher Freiheitsgrad (z.B. einachsiges Schlittensystem) installiert wird. Bei allgemeinen Fahraufgaben mit gemischter Quer- und Längsdynamik kann eine solche ungleichmäßige Verstärkung eines Kanals dagegen irritierend wirken [41].
Homogenität	AC4	Die isolierte Optimierung eines Kanals ist nicht bis zu einem beliebigen Maß sinnvoll. Bei einer Verbesserung der Sichtsimitation, z.B. durch einen größeren horizontalen Sichtbereich, ergibt sich beispielsweise eine erhöhte Erwartungshaltung an die Güte der Bewegungssimulation. Wird diese Erwartungshaltung nicht erfüllt, kann dies zu Simulatorkrankheit führen [43, 46, 67].

Tabelle 3-7: Voraussetzungen für eine homogene Gesamtsimulation

Im nächsten Kapitel wird der am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik entstandenen dynamischen LKW Fahrsimulator beschrieben. Der Detaillierungsgrad der Beschreibung orientiert sich an dem der Beschreibung der typischen Ausführungsstufen in diesem Kapitel.

4 Prüfstandsbeschreibung – FTM-Simulator

Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München ist im Zeitraum von Juni 2001 bis Juni 2004 ein LKW-Fahrsimulator entstanden (Abbildung 4-1). Seit Juni 2004 werden auf diesem Simulator in Zusammenarbeit mit einem Nutzfahrzeughersteller Versuchsreihen aus dem Bereich der Fahrerassistenzsysteme und der Mensch-Maschine-Schnittstelle durchgeführt. Die Ergebnisse der anwendungsnahen Forschungsreihen, welche vorrangig mit aktiven LKW-Kraftfahrern durchgeführt werden finden Eingang in die Entwicklungen des Herstellers.

Das Kapitel beschreibt das Konzept und die technischen Details des FTM-Simulators. Art und Detaillierungsgrad der Beschreibung orientieren sich an den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen, typischen Ausführungsstufen. Im Verlauf der Entwicklung und des Betriebs werden die von Testfahrern und Projektbeteiligten gesammelten Erfahrungen systematisch dokumentiert. Wenn Anregungen und Kommentierungen häufiger auftreten und diese auf der Basis des Grundlagenwissens plausibel sind, werden sie bei der folgenden Beschreibung der Anlage und der Begründung der Ausführungsmerkmale angeführt. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Informationen über Detailspekte der Gesamtsimulation nicht verloren gehen und deren Bedeutung für die Simulationsqualität deutlich wird.

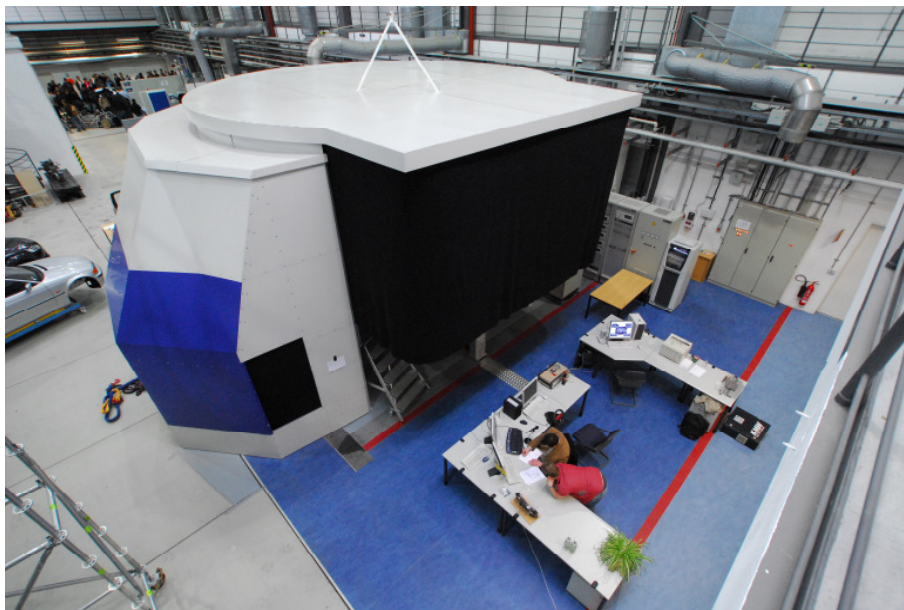


Abbildung 4-1: Der LKW Fahrsimulator am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik.

Projektierung

Kennzeichnend für die Projektierung des FTM-Fahrsimulators ist die Trennung der Kompetenzen bei der Entwicklung in Projektleitung/Integration, Simulatortechnik und Fahrzeugtechnik. Nur diese Trennung ermöglichte es, innerhalb von drei Jahren die Anlage für produktive Versuchsreihen in Betrieb zu nehmen. Die Festlegung der Aufgabenverteilung zwischen Zulieferer und Betreiber ist nicht nur für den Aufbau, sondern auch für den Betrieb schon im Vorfeld festzulegen. Fehler bei diesem Schritt führen zu erheblichem Zusatzaufwand beim späteren Upgrade von Simulatorkomponenten oder zu einer Behinderung des Versuchsbetriebs, wenn neue Prototypensysteme des wegen unklarer Schnittstellen und Zuständigkeiten nicht reibungslos implementiert werden können.

Gesamtkonzept

Der FTM-Simulator ist ein dynamischer LKW-Fahrsimulator mit einer Fixed-Screen Projektion, Standard-Bewegungssystem und einem serienmäßigen LKW-Fahrerhaus (Abbildung 4-2).



Abbildung 4-2: Der Projektionsraum des FTM-Simulators mit Standard-BWS und Sichtsimulation

In Zusammenhang mit dem Fixed-Screen Konzept wurde eine bauraumintensive, aber unter projektionstechnischen Gesichtspunkten optimal ausgelegte Rücklichtprojektion konstruiert (Abbildung 4-3). Der Projektor strahlt senkrecht auf die Mitte der Leinwand ab. Es entsteht also kein Auflösungsverlust durch Trapezkorrektur und die Helligkeitsunterschiede sind sehr gering. Neben der Ausführung als Fixed-Screen Simulator ist die PC-basierte Rechnerarchitektur ein Hauptmerkmal des Simulators, welches geringen Invest und kostengünstige Wartung mit guten Upgrade-Möglichkeiten verbindet.

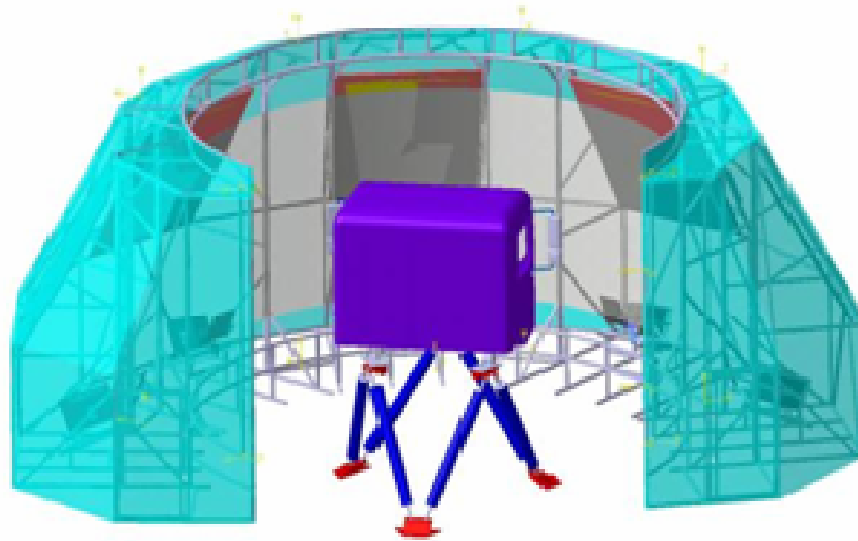


Abbildung 4-3: Konstruktiver Entwurf der 5-Kanal-Rücklichtprojektion

4.1 Sichtsimulation

Für den FTM-Simulator wurde eine Vollsicht mit 3m Augabstand realisiert. Der horizontale Sichtbereich ist bei dem installierten LKW-Mockup mit ca. 90° nach rechts und 120° nach links vollständig abgedeckt. Der vertikale Sichtbereich in der Hauptblickrichtung beträgt 45° und deckt den Blick aus der Frontscheibe des Fahrerhauses komplett ab (Abbildung 4-4). Die für die Bewegungssimulation vorgehaltene Bildhöhe über- und unterhalb des sichtbaren Bereichs in der Arbeitsposition des Mockups beträgt jeweils 181mm. Im Fall des FTM-Simulators hat sich eine Anordnung von fünf hochkant verbauten Projektoren mit einem Bildverhältnis von 4:3 als ideal herausgestellt. Dabei ergibt sich ein Überlappungsbereich für das Edge-Blending von 239mm in der vertikalen Kanalmitte.

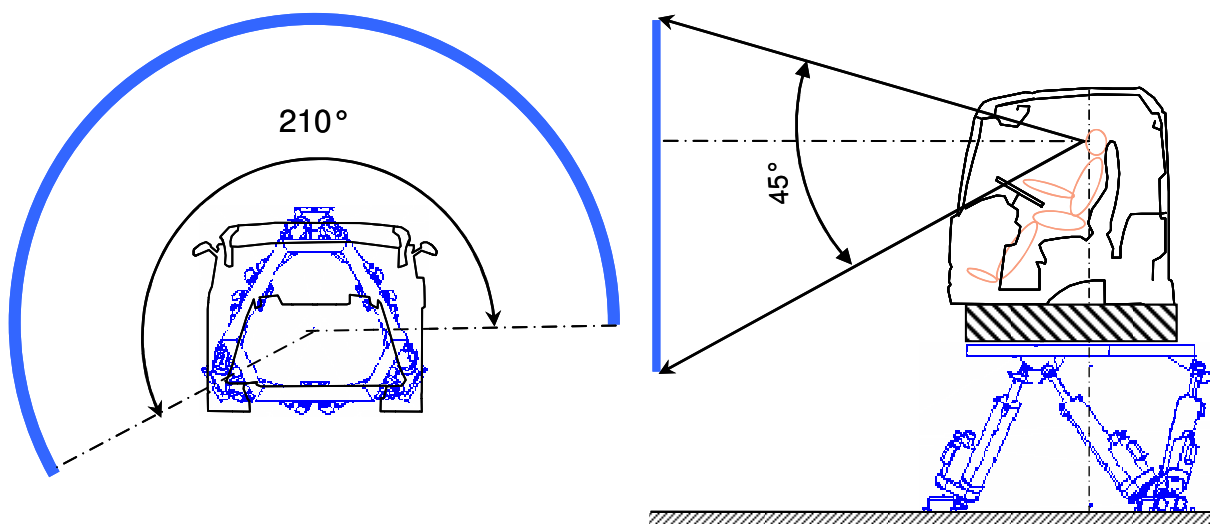


Abbildung 4-4: Horizontaler und vertikaler Sichtbereich der Sichtsimulation des FTM Simulators

Strahlengang der Rücklichtprojektion

Die Konstruktion gewährleistet, dass der Projektor senkrecht auf die Projektionsfläche abstrahlen kann, damit möglichst kein Auflösungsverlust auftritt. Um eine kompakte Bauform zu realisieren, wird der Strahlengang durch ein Weitwinkel-Zoomobjektiv mit dem Projektionsverhältnis 1:1,3 verkürzt und durch Umlenkspiegel „zusammengefaltet“ (Abbildung 4-5). Bei der Auslegung dieser Klappungen ist auf Abschattungen durch das Projektorgehäuse zu achten.

Aus Kostengründen wurden für die übergroßen Umlenkspiegel Folienspiegel mit einer Aluminium-Silizium-Beschichtung statt Glas-Oberflächenspiegel verwendet. Beim Betrieb der Anlage zeigt sich jedoch die mindere Qualität der Folienspiegel. Produktionsbedingt sind Ungleichmäßigkeiten in der Oberfläche vorhanden, die im projizierten Bild eine Musterung erzeugen. Diese Musterung wird als nicht bewegter Bildbestandteil im bewegten Bild wahrgenommen und negativ beurteilt. Es sollten also Glas-Oberflächenspiegel verwendet werden.

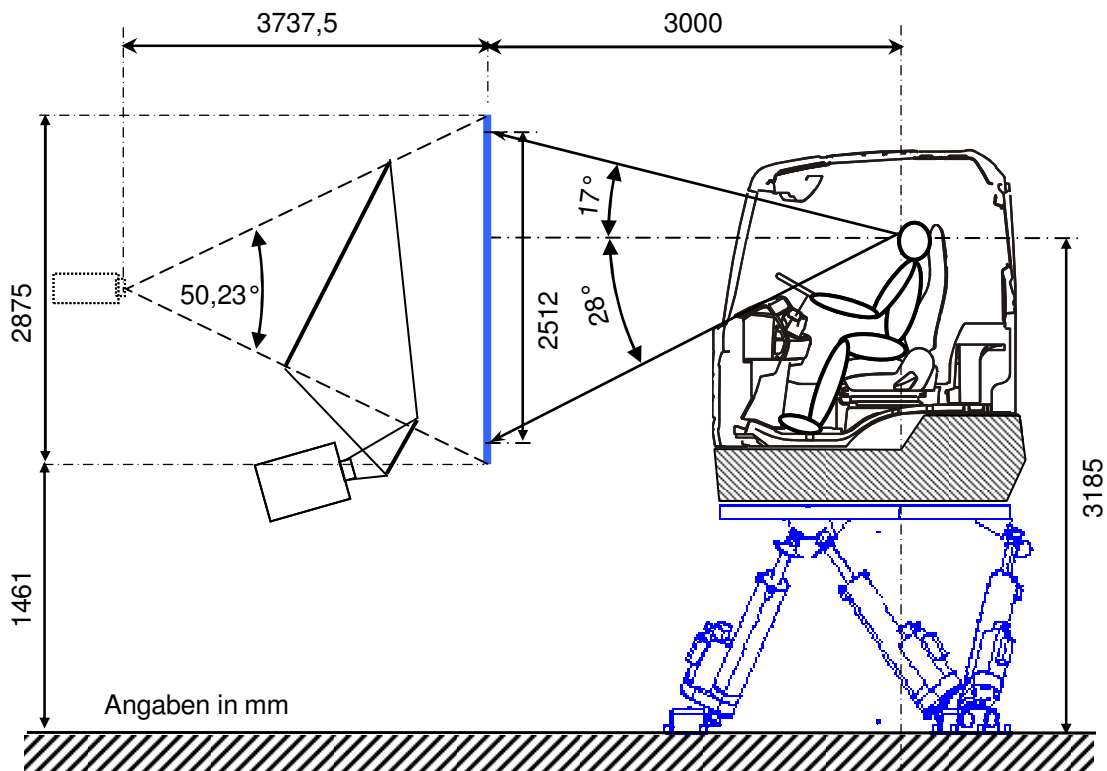


Abbildung 4-5: 2-fach gefalteter Strahlengang der FTM Rückprojektion

Leinwandauswahl und –aufspannung

Eine kostengünstige Lösung zur Realisierung einer großen, unterbrechungsfreien, zylindrischen Projektionsfläche bieten aufgespannte Rückprojektionsfolien. Im FTM-Simulator wird die Leinwand mit ca. 100 Expandern am Projektionssystem befestigt. Um die durch die Expander verursachte Welligkeit in der Folie vom Projektionsbereich fernzuhalten, wird die Folie über einen Hilfsrahmen gespannt. Durch die zylindrische Aufspannung ergibt sich zwangsläufig eine Wölbung der Leinwand in vertikaler Richtung (Abbildung 4-6), welche durch eine in der Soft-

ware des Sichtsystems implementierte Geometriekorrektur ausgeglichen werden muss. Um diese Wölbung zu minimieren, ist die Vorspannung durch die Expander gering zu halten. Die Auf-

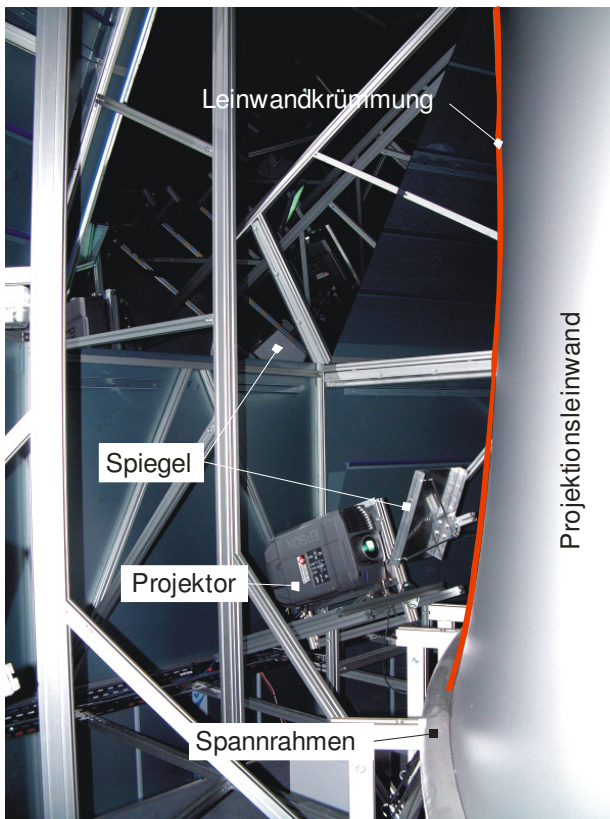


Abbildung 4-6: Aufspannung und resultierende Wölbung der FTM Rückprojektionsleinwand

spannung hat sich als sehr praxistauglich erwiesen, da die Expander die temperaturbedingte Längenänderungen der Leinwand aufnehmen können, ohne die Vorspannung wesentlich zu verändern.

Der Gain-Faktor ist ein Charakteristikum der Projektionsleinwand, der angibt, wie stark das Licht, ausgehend von einem Abstrahlungspunkt der Projektionsleinwand, in eine bestimmte Richtung gebündelt wird. Ein hoher Gain-Faktor der Leinwand bedingt starke Helligkeitsschwankungen abhängig vom Standpunkt des Betrachters. Für eine zylindrische Projektionsfläche mit außermittigem und beweglichem Augpunkt ist daher auf die Verwendung von Projektionsleinwänden mit hohen Gain-Faktoren zu verzichten. Die unterschiedliche Lichtverstärkung wird insbesondere im Bereich des Edge-Blending zu

Unregelmäßigkeiten führen. Am FTM-Simulator wird eine Rückprojektionsfolie mit dem Gain-Faktor eins verwendet.

Rückspiegelansichten

In dem Konzept sind neben den zwei Hauptspiegeln außen links und rechts auch der für das Rechtsabbiegen unerlässliche Weitwinkelspiegel rechts realisiert. Da auf der linken Seite der Schulterblick aus dem Fahrerhaus durch die Frontsichtprojektion abgedeckt ist, konnte hier auf den Weitwinkelspiegel verzichtet werden. Die beiden am realen Fahrzeug üblichen Bordstein Spiegel sind in der Realität notwendig, um dem Überfahren von Bordsteinen vorzubeugen und Personen sichtbar zu machen, die sich unmittelbar neben dem Fahrerhaus befinden. Beide Gefahren sind im Simulator nicht gegeben, weswegen die Spiegel zunächst nicht realisiert wurden.

Als Bildmedium wurden Desktop LCD-Monitore mit WXGA-Auflösung (1280x768 Pixel) mit einer Helligkeit von 450cd/m^2 und einem Kontrastverhältnis von 400:1 verwendet. Beim Betrieb der Anlage wird die breite Umrandung der Monitore und der fehlende Effekt der Bewegungsparallaxe negativ beurteilt. Die Akzeptanz der Monitore hinsichtlich der Bildqualität ist

aber positiv und wird als hilfreich für die Ausrichtung des Fahrzeugs und die Spurhaltung beschreiben [203].

Projektorauswahl

Die Wunschauflösung von einer Bogenminute vom Fahrerauge aus entspricht bei dieser Anordnung einer Pixelgröße von ca. 1mm. Die erforderliche Auflösung von 2875*2390 (v*h) Punkten wird durch den derzeitigen Stand der digitalen Projektorentechnik nicht abgedeckt. Es wurde daher die höchstmögliche, im Rahmen des Budgets abzubildende Auflösung installiert. In dem projizierten Bild mit SXGA+ Auflösung (1400*1050) sind dabei zwar im stationären Bild für manche Probanden noch Pixel sichtbar, was im Fahrbetrieb aber nicht auszumachen ist. Die Auflösung in Winkeleinheiten ändert sich bei der gekrümmten Leinwand und ist in der Mitte des Projektionsbereichs am besten. Beim FTM-Simulator ergibt sich dort eine Auflösung von 2,35 Bogenminuten/Pixel.

Um das erforderliche Kontrastverhältnis von 5:1 zwischen Raumlicht und Bildhelligkeit zu realisieren, muss der Projektionsraum gut gegen Lichteinfall geschützt werden. Bei einem Helligkeitswert von ca. 80 Lux, wie es für den mittels einer Dachkonstruktion mit Filzabhängung abgeschatteten Simulatorinnenraum angesetzt wird, ergibt sich eine erforderliche Helligkeit von 400Lux (5*80Lux) auf der Projektionsleinwand. Bei einer Bildfläche von 6,9m² für einen einzelnen Projektor ist demnach ein Lichtstrom des Projektors von 2760 Lumen (400Lux*6,9m²) wünschenswert. Der verbaute Projektor hat eine Lichtleistung von 2500 Lumen, was dem errechneten Idealwert sehr nahe kommt. Der Projektor besitzt ein sehr hohes Kontrastverhältnis von 1:1100, was sich auf die Wahrnehmung von Auflösung und Helligkeit positiv auswirkt.

4.2 Bewegungssimulation

Der FTM Simulator besitzt ein elektrisch angetriebenes Standard-Bewegungssystem mit 1,5 Tonnen Nutzlast (Abbildung 4-7) und folgenden Leistungsdaten:

- Fahrwege x/y-Achse ³: ±0,6m
- Fahrweg z-Achse: ±0,4m
- Rotatorische Auslenkung x/y-Achse: ±26°
- Rotatorische Auslenkung z-Achse: ±39°
- Max. Beschleunigung: 6m/s²

Die Eigenfrequenz des Bewegungssystems liegen gemäß der technischen Dokumentation bei >8Hz, wobei dieser Wert von der Nutzlast abhängig ist. Für die ausgeführte Konfiguration liegen die gemessenen Werte bei ca. 9Hz in x- und y-Richtung und bei 11Hz in der konstruktiv bedingt steiferen z-Richtung. Das System ist auf die Darstellung von niederfrequenten Fahrzeug- und

³ KOS: Rechtwinklig, kartesisch, x in Fahrtrichtung positiv.

Bahnbewegungen mit großen Amplituden ausgelegt und daher für die Komfortuntersuchungen im Bereich höherer Frequenzen wenig geeignet.

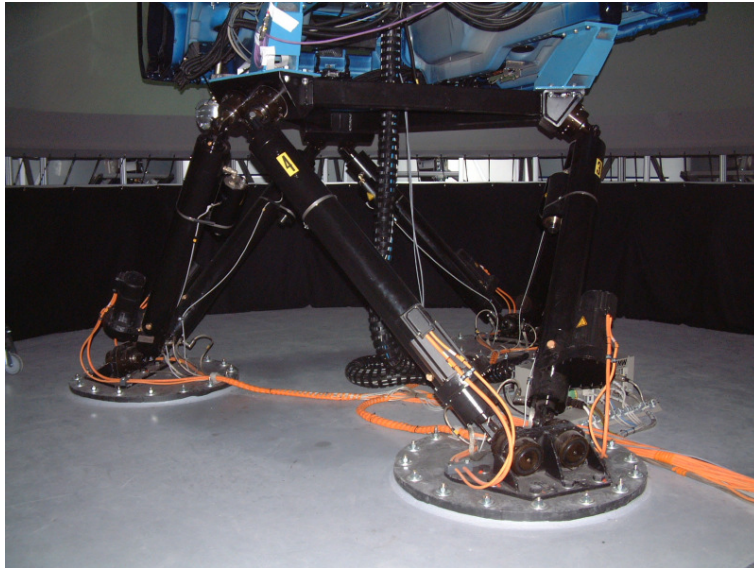


Abbildung 4-7: Standard-Bewegungssystem des FTM Simulators mit 6 Freiheitsgraden

Motion-Cueing

Nach der Inbetriebnahme des wird das Motion-Cueing ausgehend von einer Grundkonfiguration an die Belange des LKW-Simulators angepasst. Ziel dieses Vorgangs ist es, neben einer möglichst realitätsnahen Darstellung der Aufbaubewegungen auch eine gute Verträglichkeit für die Mehrzahl der Probanden zu erreichen. Diese Zielsetzungen erweisen sich als konfliktär. Eine von fahrdynamisch versierten Probanden bevorzugte Abstimmung erweist sich im Versuchsbetrieb mit länger dauernden Versuchsfahrten als wenig verträglich.

Ausgangsbasis der Abstimmung ist eine Konfiguration, in der verstärkt Neigungssimulation zur Darstellung länger dauernder Bahnbeschleunigungen verwendet wird. Kurzfristige Beschleunigungen werden bei dieser Abstimmung durch translatorische Bewegungen abgebildet.

Die Abstimmung des Motion-Cueing erfolgte subjektiv mit erfahrenen LKW-Fahrern. Die beste Akzeptanz erfährt eine Justierung, in der Neigungssimulation zur Darstellung der Bahnbeschleunigungen fast komplett unterdrückt und ausschließlich die Aufbaubewegungen simuliert werden. Die für den Versuchsbetrieb am FTM-Simulator gewählte Grundabstimmung wird im Folgenden charakterisiert.

Darstellung von Beschleunigungen in x- und y-Richtung

Die Anwendung der Neigungssimulation zur Darstellung von Bahnbeschleunigungen ist stark reduziert. Der in Abbildung 4-8 gezeigte Wankwinkel resultiert aus den Aufbaubewegungen. Die Verläufe von Wankwinkel und Querbeschleunigung sind geglättet, um den Einfluss der vom Bewegungssystem erzeugten geschwindigkeitsabhängigen Vibrationen (1-3,5Hz) zu eliminieren.

Das eigentliche Signal wird ohne eine solche Glättung von denen durch diese Schwingungen erzeugten hochfrequenten Beschleunigungen überlagert.

Die Möglichkeit, kurzzeitige translatorische Beschleunigungen durch translatorische Verfahrbewegung zu simulieren wird im FTM Simulator nicht genutzt. Zwar wird das subjektive Empfinden zu Beginn einer Lenkbewegung durch einen kurzen translatorischen Impuls verbessert, durch die erforderliche Rückführung des BWS in die Nulllage, den sog. Washout, ergeben sich aber nachfolgend qualitativ falsche Bewegungsinformationen, welche als unrealistisch und äußerst negativ beurteilt werden.

Auf Grund der geringen Verfahrwege kann der translatorische Impuls nur für sehr kurze Zeit aufrechterhalten werden. Diese Zeitspanne reicht nicht aus, um durch Neigungssimulation einen entsprechenden Beschleunigungseindruck zu erzeugen. Dieser Effekt kann erst bei Bewegungssystemen mit höheren Verfahrwege von ca. $\pm 1,5\text{m}$ durch ein entsprechendes Motion-Cueing egalisiert werden.

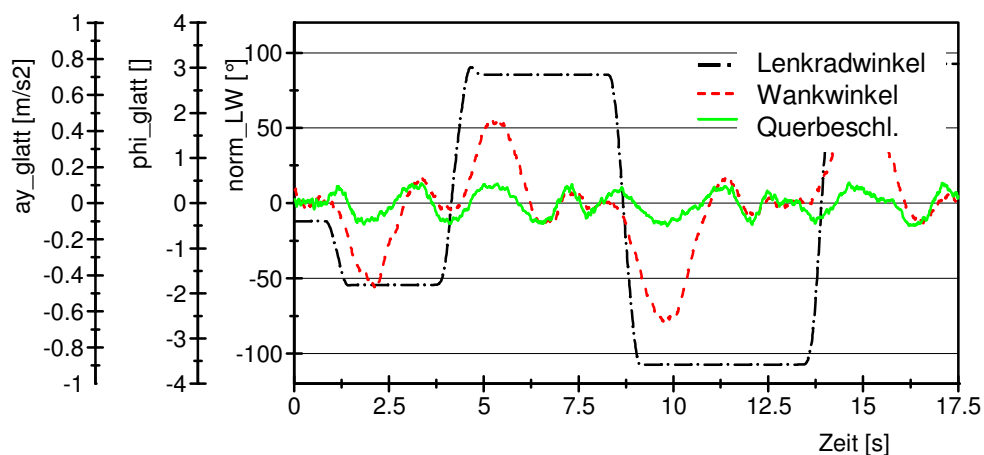


Abbildung 4-8: Slalomfahrt mit 30km/h, Lenkradwinkel, Wankwinkel und Querbeschleunigung

Der Verlauf des Wankwinkels in Abbildung 4-8 zeigt das Zurück- und das nachfolgende gedämpfte Überschwingen der Fahrerhausbewegung, wie es auch in der Realität zu erwarten ist. Durch Messungen am Realfahrzeug und einer erneuten Feinabstimmung der Bewegungssimulation könnte hier eine weitere Verbesserung erzielt werden.

Die beschriebenen Eigenschaften gelten analog auch für das längsdynamische Verhalten der Beschleunigungssimulation.

Darstellung von Beschleunigungen in z-Richtung

Die Straßenoberfläche der FTM-Datenbasis ist lokal eben und enthält nur makroskopische Höhenunterschiede, so dass das simulierte Fahrzeugmodell keine fahrbahninduzierte vertikale Anregung erfährt. Lediglich Lageänderungen des simulierten Fahrzeugs sind spürbar, wie sie beispielsweise beim Überfahren von Randsteinen auftreten.

Um den Geschwindigkeitseindruck zu verbessern, wird das Bewegungssystem durch geschwindigkeitsabhängige, statistisch erzeugte Vibrationen in allen drei Raumrichtungen beaufschlagt. Am stärksten wird dabei die vertikale Komponente dieser Vibrationen gewichtet, um fahrbahninduzierte, vertikale Schwingungen zu simulieren. Diese Bewegungskomponente trägt wesentlich zum Realitätsempfinden während der Fahrt bei.

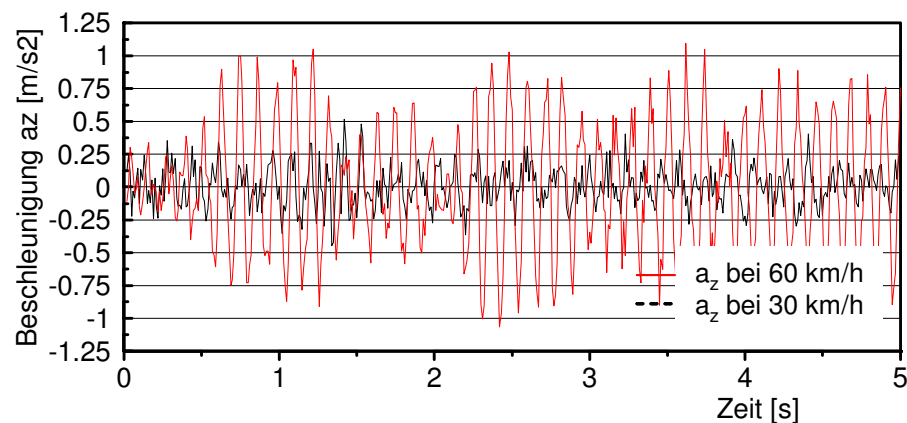


Abbildung 4-9: Geschwindigkeitsabhängige, vertikale Vibrationen zur Verbesserung des Geschwindigkeitsempfindens am FTM Simulator.

In Abbildung 4-9 ist der vertikale Anteil dieser Schwingungen beispielhaft für die Fahrgeschwindigkeiten 30 und 60 km/h gegenübergestellt. Die Variation der Verstärkungsfaktoren erfolgt in 4 Geschwindigkeitsbereichen⁴. Die subjektive Beurteilung ist am besten, wenn diese Vibrationen bei 4 Hz tiefpassgefiltert werden. Höhere Frequenzen werden als unangenehm empfunden.

Darstellung der Gierbewegung (Rotation um die z-Achse)

Gierbewegungen als Reaktion auf die Lenkeingaben des Fahrers werden bei der Bewegungssimulation des FTM-Simulators nicht dargestellt. Die in Abbildung 4-10 dargestellten Giergeschwindigkeiten resultieren aus dem bereits erwähnten statistisch erzeugten, 3-dimensionalen Vibrationen, welche in Ihrer Kombination auch Gierbewegungen induzieren und damit auf den Kanal der Giergeschwindigkeitsmessung übersprechen.

Da Vibrationen bis zu einer Frequenz von 3,5 Hz dargestellt werden, resultieren hochfrequente Giergeschwindigkeiten im Bereich bis zu $\pm 20^\circ/\text{s}$.

⁴ 0-3 m/s, 3-10 m/s, 10-20 m/s und >20 m/s

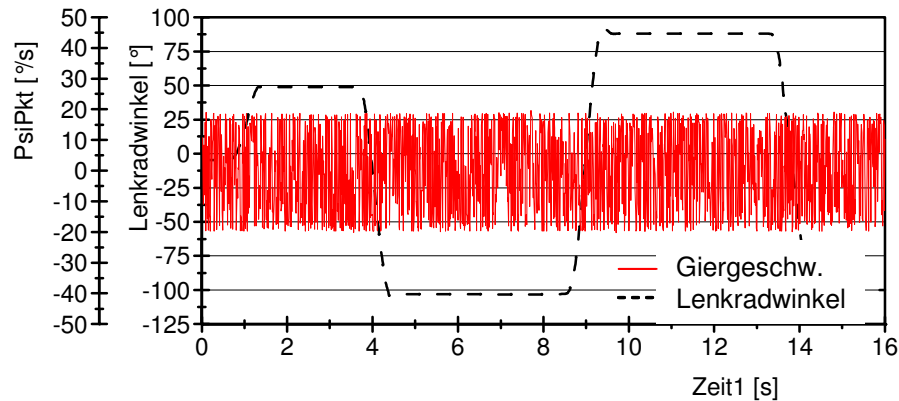


Abbildung 4-10: Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit bei Slalomfahrt mit 30km/h

Darstellung von Nicken und Wanken (Rotation um die y- bzw. x-Achse).

Im Gegensatz zu den Bahnbeschleunigungen werden die Nick- und Wankwinkel des Fahrerhauses skaliert, aber realitätsnah dargestellt. Der Skalierungsfaktor beträgt in der Konfiguration des FTM Simulators 0,5 so dass sich bei einer Vollbremsung aus 60km/h ein Nickwinkel von etwa 5° einstellt (Abbildung 4-11).

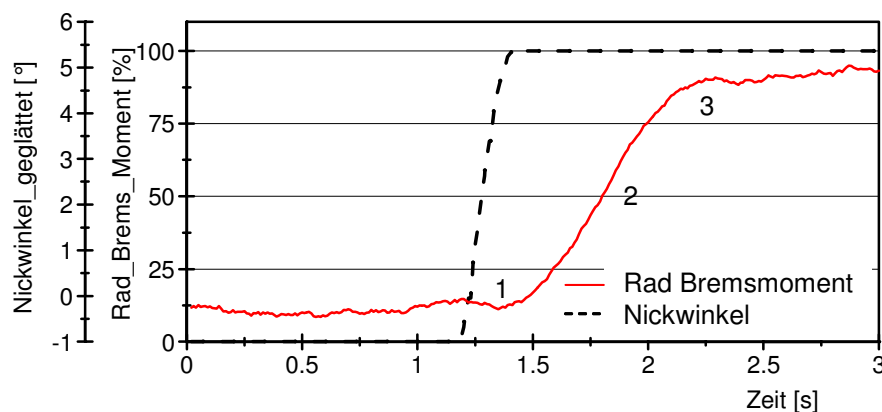


Abbildung 4-11: Rad-Bremsmoment und Nickwinkel (FTM Simulator) für eine Vollbremsung aus 60km/h
1,2,3 * Nachfolgend beschriebene Charakteristika des Motion-Cueings am FTM Simulator

Neben der Skalierung werden in der Darstellung mehrere Effekte sichtbar, welche kennzeichnend für die Abstimmung des FTM-Simulators sind:

1. Hochpassfilterung: Das Motion-Cueing des FTM Simulators erlaubt die Festlegung von Verstärkungsfaktoren in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit, nicht jedoch von der Stärke der Beschleunigung. Bei hohen Geschwindigkeiten bewirken deshalb auch geringe Betätigungen des Bremspedals bzw. des Lenkrads unrealistisch starke Nick- und Wankreaktionen.

Um diesen Effekt zumindest bei nur kurzzeitiger Fahrereingabe wie dem Tippen auf das Bremspedal oder höherfrequenten Ausgleichsbewegungen am Lenkrad um die Nulllage ab-

zuschwächen, wird das Eingangssignal mit einem Hochpassfilter bei 1-1,5Hz (abhängig vom Versuch) beaufschlagt. Diese Filterung bewirkt eine Zeitverzögerung beim Aufbau des Nickwinkels. Während das Realfahrzeug nach ca. 0,15-0,2 Sekunden die Nickgeschwindigkeit vollständig aufgebaut hat, geschieht dies am FTM Simulator erst nach 0,5-0,6 Sekunden. Es ist zu bemerken, dass diese Unzulänglichkeit nicht durch die Leistungsfähigkeit des Bewegungssystems bedingt ist, sondern durch fehlende Konfigurationsmöglichkeiten der Software zu Stande kommt.

2. Begrenzung der Verfahrgeschwindigkeit: Obwohl Nick- und Wankbewegung als eigener Kanal im Motion-Cueing verarbeitet werden und daher nicht der Begrenzung der Winkelgeschwindigkeit unterliegen, wie dies bei der Neigungssimulation der Fall ist, ist in der Grundkonfiguration des Motion-Cueings auch für diesen Kanal eine Beschränkung der Verfahrgeschwindigkeit vorhanden. Die Verminderung dieser Begrenzung bietet Optimierungspotenzial für die weitere Abstimmung des Simulators. Ein deutlicher proportionales Ansprechen des Bewegungssystems auf die Eingaben des Fahrers kann damit erzielt werden.
3. PT1 Verhalten: Um ein Überschwingen der Nickbewegung und damit fehlerhafte Bewegungsinformationen zu vermeiden, zeigt der Zeitschrieb des Nickwinkelverlaufs das Verhalten eines PT1-Glieds.

Für die Darstellung von Wankwinkeln gelten diese Aussagen analog.

4.3 Geräuschsimulation

Die Geräuscherzeugung im FTM-Simulator beruht auf einer Bibliothek von 35 auf einem PC gespeicherten Soundsamples. Die Soundsamples werden auf drei Stereo-Soundkarten, also insgesamt sechs Monokanälen ausgegeben. Es hat sich gezeigt, dass, trotz der Verwendung von Originalgeräuschen, ein großes Optimierungspotential bei der Abstimmung der Geräusche hinsichtlich Lautstärke, Ausgabeort und Frequenzinhalt existiert. So werden z.B. unterschiedliche Frequenzinhalte des Motorengeräuschs auf zwei Lautsprechern und einem Körperschallwandler ausgegeben. Der Einsatz eines digitalen Equalizers mit acht Kanälen, welcher die Mischung und Filterung der einzelnen analogen Signale erlaubt ist für diesen Zweck unumgänglich. Die Ausgangskanäle des Equalizers werden einzeln von zwei Mono-Verstärkern mit je vier Kanälen verstärkt und an die Lautsprecher weitergegeben. Die Belegung der Kanäle mit den Geräuschen und Ausgabeorten ist im Anhang dokumentiert. Im Fahrerhaus sind sechs Lautsprecher und ein am Fahrersitz befestigter Körperschallwandler verbaut. Fahrer und Versuchsleiter kommunizieren über eine Mikrophon-Verbindung miteinander. Mit Ausnahme des digitalen Equalizers werden Hifi-Komponenten aus dem Consumerbereich verwendet.

Die im Zusammenhang mit dem Motorengeräusch und dem Reifenabrollgeräusch angesprochenen Soundsamples werden mit hochwertigen Mikrofonen auf einem Rollenprüfstand am Originalfahrzeug aufgenommen. Für das Motorengeräusch werden insgesamt neun Soundsamples verwendet. Dabei wird das Motorengeräusch bei drei verschiedenen Lastzuständen (Leerlauf,

Teillast, Volllast) mit jeweils drei stationären Drehzahlen (1000, 1500, 1900 U/min) aufgenommen. Die Zustände zwischen diesen aufgezeichneten Stützpunkten werden hinsichtlich Frequenz und Pegel interpoliert, sodass sich ein kontinuierlich variables Geräusch beim Durchlaufen der Lastzustände und Geschwindigkeiten ergibt. Das Reifenabrollgeräusch wird bei 4 verschiedenen Geschwindigkeiten aufgenommen. Die restlichen Soundsamples werden vom Zulieferer professionell synthetisch erzeugt. Alle kontinuierlich abzuspielenden Soundsamples werden zu ca. 0,5-1s langen Stücken in geeigneter Weise zugeschnitten und von der Soundsimulation in einer Endlosschleife abgespielt. Von äußerster Wichtigkeit für den Beitrag zum Präsenzepfinden ist es, dass beim geloopten Abspielen der Samples keine Knackgeräusche, bzw. pulsierenden Lautstärken- u/o Frequenzunterschiede hörbar werden.

Die Erfahrungen am FTM-Simulator zeigen, dass schon kleine Fehler in der Geräuschsimulation sowie fehlende oder überflüssige Geräusche einen unmittelbaren, stark störenden Einfluss auf das Präsenzepfinden haben. Eine Geräuschsimulation, welche detailgetreu am Originalfahrzeug aufgenommene Geräusche verwendet und auch die singulär auftretenden Geräusche, wie z.B. dem Anlasser, große Aufmerksamkeit widmet, ist unerlässlich für das Präsenzepfinden. Die Abstimmung ist subjektiv vorzunehmen, da unter Umständen ein Abweichen von den objektiven Verhältnissen des Realfahrzeugs erforderlich ist.

4.4 Fahrdynamikmodell und Reifenmodell

Das Fahrdynamikmodell des FTM-Simulators ist ein Zweispurmodell mit drei Massen und sieben Freiheitsgraden, welches eine LKW-Zugmaschine mit Sattelaufleger repräsentiert (Abbildung 4-12).



Abbildung 4-12: Visualisierung des Sattelaufleger LKW am FTM-Fahrsimulator

Das Modell besteht einer Masse für das Fahrgestell mit den drei Freiheitsgraden Gieren und Translation in x-/y-Richtung. Das Fahrerhaus ist als eigene Masse mit den Freiheitsgraden Nicken, Wanken und Huben modelliert und über ein Feder-Dämpfer Modell mit dem Fahrgestell verbunden. Der Auflieger des Sattelzugs ist als weitere Masse modelliert mit dem Knickwinkel

als Freiheitsgrad. Dieses Modell hat sich zusammen mit der Abstimmung des Bewegungssystems als ausreichend für die bisherigen Untersuchungen im Sinne der Verträglichkeit erwiesen. Das Motion-Cueing eliminiert in der jetzigen Abstimmung die aus den Bahnbewegungen resultierenden Bewegungsgrößen fast vollständig und stellt hauptsächlich die errechneten Aufbaubewegungen dar.

Es ist ein Modell des Motors mit 390kW und einem automatisierten Handschaltgetriebe mit 12 Gangstufen implementiert. Das Simulationsmodell ermöglicht die Fahrt in beladenen und unbeladenen Zustand (20to bzw. 40to).

Lenkungsmodell

Das Lenkungsmodell bildet in einfacher Form die geometrischen Verhältnisse der Lenkung des Originalfahrzeugs ab. Dabei gehen die Größen Nachlaufstrecke, die Länge des Lenkstockhebels und die Übersetzung des Lenkgetriebes ($i=24$) in die Berechnung des Lenkradmoments ein.

Die im Reifenlatsch errechneten Quer- und Längskräfte werden über diese geometrischen Größen in ein Moment am Lenkrad umgerechnet. Um das errechnete Lenkmoment an die Verhältnisse des Realfahrzeugs mit der entsprechenden Lenkkraftunterstützung anpassen zu können, sind in Look-Up-Tables Verstärkungswerte hinterlegt, mit denen die Geschwindigkeitsabhängigkeit und die Abhängigkeit des Moments vom Lenkwinkel justiert werden kann. Die Formeln zur Berechnung des Moments sind im Folgenden aufgeführt.

$$M_{Ist} = (F_{svl} + F_{svr}) * n_k - (F_{lvl} - F_{lvr}) * r_l + M_{vl} + M_{vr} - M_{Friction} * u_{eps}$$

Formel 1: Moment vor dem Lenkgetriebe

mit

- M_{Ist} : Moment vor dem Lenkgetriebe
- F_{svl}, F_{svr} : Seitenkräfte im linken/rechten Reifenlatsch des Vorderrads
- n_k Nachlaufstrecke
- F_{lvl}, F_{lvr} : Längskräfte im linken/rechten Reifenlatsch des Vorderrads
- r_l : Radius (Hebelarm) des Lenkstockhebels
- M_{vl}, M_{vr} : Aus dem Reifensturz resultierendes Moment am linken/rechten Vorderrad
- $M_{Friction}$: Reibmoment der Lenkung
- u_{eps} : Verstärkungsfaktor für das Reibmoment

Das Lenkradmoment wird berechnet zu:

$$M_l = M_{Ist} / (i_1 * vv1.getCurveValueY(3.6 * v)) + r_{ueckst_m_deltal}.getCurveValueY(deltal);$$

Formel 2: Moment nach dem Lenkgetriebe

mit:

- M_{1st} : Moment vor dem Lenkgetriebe
- i_1 : Übersetzung Lenkgetriebe
- $vvl.getCurveValueY$: Geschwindigkeitsabhängiger Anpassfaktor für die Nachbildung der Lenkkraftunterstützung (Look-Up-Table Wert)
- v : Fahrgeschwindigkeit
- $rueckst_m_deltal.getCurveValueY$: Vom Lenkradwinkel abhängiger Anteil des Lenkmoments (Rückstellmoment, Look-Up-Table Wert)

Reifenmodell

Die Kräfte im Reifenlatsch werden durch lineare Zusammenhänge ohne die Sättigung der Reifenkennung angenähert. Längs- und Querkräfte sind voneinander unabhängig modelliert. Dem Lenkungsmodell hinterliegt bei niedrigen bis mittleren Querbeschleunigungen eine lineare Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen Lenkwinkel und Seitenkraft repräsentiert.

4.5 Fahrerstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

In den ersten Versuchsreihen soll der zum Zeitpunkt 12/2003 aktuelle Serienstand des Fahrerplatzes mit seinen Bedien- und Anzeigeelementen untersucht werden (Abbildung 4–13). Es kommt daher ein serienmäßiges LKW-Fahrerhaus zum Einsatz. Um die Bewegungsenvelope des auf der Stewart-Plattform montierten Fahrerhauses so gering wie möglich zu halten, wird der kleinste und damit leichteste Kabinentyp ohne Hochdach und Schlafgelegenheit gewählt. Um Restlichteffekte auf die Projektion gering zu halten wird eine dunkelblaue Karosseriefarbe verwendet.



Abbildung 4-13: Im FTM-Simulator verbautes Cockpit aus dem Realfahrzeug

Das Gewicht der voll ausgestatteten Kabine beträgt ca. 650kg. Die verbaute Elektrik und Elektronik der Messtechnik, der Spannungsversorgung und der Restbussimulation erhöhen das Gewicht auf ca. 750kg. Das Bewegungssystem mit einer Nutzlast von 1500kg wurde gewählt, um eine Reserve für die spätere Erweiterung des Bewegungssystems mit einer translatorischen Fahrvorrichtung und den dabei auftretenden Zusatzbelastungen vorzuhalten.

Das Fahrerhaus ist fest mit dem Bewegungssystem verschraubt. Die Verwendung der serienmäßigen Feder-Dämpferelemente der Fahrerhauslagerung wird verworfen, da für diese Lösung das Übertragungsverhalten dieser Elemente detailliert bekannt und im Motion-Cueing berücksichtigt werden muss. Dies entspricht nicht dem Stand der Technik bei existierenden Motion-Cueing-Algorithmen und birgt einen erheblich höheren Abstimmungsaufwand.

Lenkung

Die Lenkmomentensimulation ist als Hohlwellenmotor ausgeführt. Die Ansteuerung erfolgt über CAN-Bus Signale aus dem Lenkungsmodell des Fahrdynamikmodells. Da das Rechenmodell der Lenkung keinen Reibungs- und keinen Dämpfungsanteil enthält, werden diese Komponenten des Lenkmoments über ein hydraulisch beaufschlagtes Pumpenmodul erzeugt. Die Endanschläge der Lenkung sind mechanisch über eine Vorrichtung aus Kugelumlaufmutter und Gewindespindel realisiert (Abbildung 4-14).

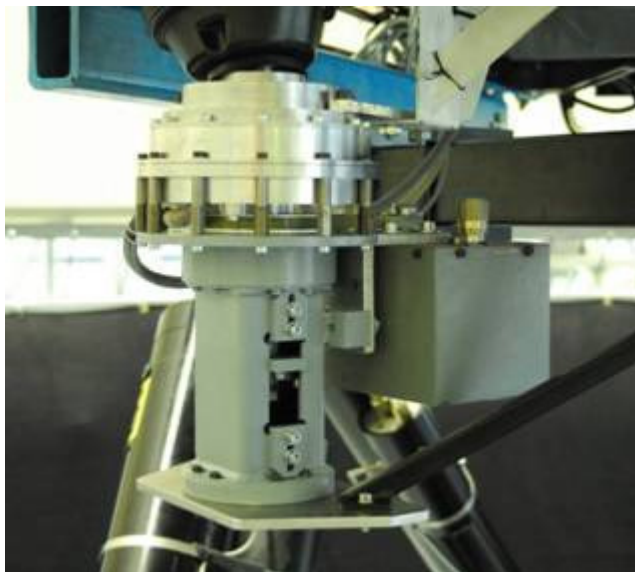


Abbildung 4-14: Konstruktion der Lenkmomentensimulation des FTM Fahrstimulators mit Hohlwellenmotor, ölhydraulischer Dämpfung und mechanischem Endanschlag.

4.6 Datenbasis und Verkehrssimulation

Die statische Datenbasis des FTM-Simulators umfasst ein Straßennetz von ca. 125km Länge, welches Autobahnen, Überlandstrecken und eine Steigungsstrecke enthält. Eine Übersicht über die Datenbasis des FTM-Simulators findet sich im Anhang. Neben einem umfangreichen Stadtgebiet können auch ländliche Gegenden mit Ortsdurchfahrten und Industriegebiete befahren wer-

den (Abbildung 4-15). Sowohl der Nah- als auch der Fernbereich der Datenbasis sind merkmalsreich gestaltet und detailliert texturiert. Neben verschiedenen Straßenbelägen sind Sonderszenen, wie Baustellen, Parkplätze etc. vorhanden. Die Wetter- und Straßenbedingungen sind frei wählbar und können auch während der Fahrt variiert werden. Elemente der Datenbasis wie Verkehrsschilder und Bebauungen können nicht verändert werden. Es kann unter Tag- und Nachtbedingungen gefahren werden.



Abbildung 4-15: Bilder der Datenbasis des FTM Simulators (Autobahn, Ortschaft und Innenstadt)

Die Verkehrssimulation greift auf eine Datenbasis von rund 120 verschiedenen Kraftfahrzeugen zurück. Es sind Krafträder, PKW, leichte und schwere LKW, sowie einige Sonderfahrzeuge (Polizei, Feuerwehr etc.) enthalten. Für die Steuerung der Verkehrsteilnehmer existieren folgende Möglichkeiten:

- Autonomer Verkehr: Fahrzeuge, welche automatisiert rund um das Ego-Fahrzeug eingesetzt werden und sich gemäß der Verkehrsregeln verhalten. Jedes dieser Fahrzeuge besitzt ein an die Fahrzeugart angepasstes Modell des Fahrers und der Fahrdynamik. Die Art der Fahrzeuge wird zufällig von der Software gewählt. Mittels einer Konfigurationsdatei kann die Maximalzahl dieser Fahrzeuge vorgegeben werden, sodass die globale Verkehrsdichte bestimmt werden kann.
- Einzelfahrzeuge mit Soll-Geschwindigkeit und Soll-Kurs: Der Anwender gibt in einer Konfigurationsdatei den Einsetzort für ein frei wählbares Fahrzeug vor. Ebenso kann er diesem Fahrzeug eine Fahrtroute und ein Soll-Geschwindigkeitsprofil vorgeben. Das Fahrzeug wird eingesetzt, wenn das Ego-Fahrzeug einen Auslösepunkt überfährt.
- Einzelfahrzeuge mit vorgegebenem Geschwindigkeitsprofil: Der Anwender gibt in einer Konfigurationsdatei den Einsetzort für ein frei wählbares Fahrzeug vor. Diesem Fahrzeug kann ein vorher vom Anwender erzeugtes Geschwindigkeitsprofil in der Form eines 2-spaltigen Text-Files vorgegeben werden. Das Fahrzeug wird sich unabhängig von seinen physikalischen Möglichkeiten gemäß dieser Vorgabe bewegen. Diese besondere Art der Verkehrssteuerung wurde für den Test von Längsdynamikregelsystemen implementiert.
- Sonderfahrzeug: Abbildung 4–16 zeigt die Bedienelemente und die Sichtsimulation des vom Bedienplatz des Versuchsleiters aus frei zu steuernden Sonderfahrzeugs. Über Konfi-

gurationsdateien können Fahrzeugparameter, Lenkübersetzung und der Einsetzpunkt des Fahrzeugs definiert werden. Das Sonderfahrzeug wird mittels eines Lenkrads aus dem PC-Consumerbereich bedient und ermöglicht einen an das Verhalten des Probanden angepassten Versuchsablauf.



Abbildung 4-16: Steuerung des Sonderfahrzeugs am FTM-Simulator mit 1-Kanal Sichtsystem

Im folgenden Kapitel erfolgt die Verknüpfung der Erkenntnisse über den Fahrvorgang und die Simulatortechnik zu einer Methode, welche die Ableitung eines Simulatorkonzepts aus dem geplanten Anwendungsspektrum ermöglicht.

5 Entwicklung einer Methode zur Konzipierung von Fahr simulatoren

Die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Grundlagen aus den Bereichen Fahrzeugtechnik, Fahrzeugführung, Simulatoranwendung und Simulatortechnik werden im folgenden Syntheseteil zueinander in Beziehung gesetzt. Darauf aufbauend wird eine Methode zur Herleitung eines Simulatorkonzepts aus der geplanten Anwendung abgeleitet. Abbildung 5-1 ordnet die Entwicklung der Methode in den Zusammenhang der gesamten Arbeit ein und zeigt die Vorgehensschritte dieses Kapitels auf. Anwendungsgebiete, welche der FTM-Simulator nicht abdeckt, werden durch Informationen aus der Literatur ergänzt.

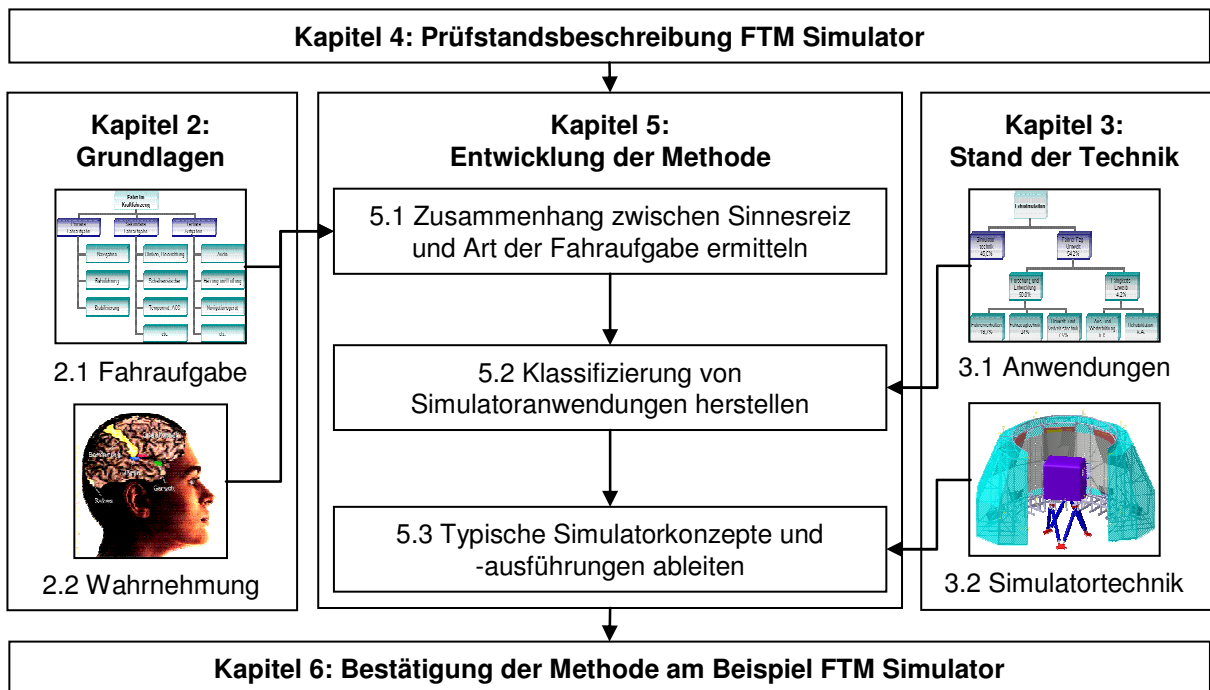


Abbildung 5-1: Aufbau der Arbeit – Vorgehensschritte zur Entwicklung der Methode

Die Entwicklung der Methode erfolgt in drei Schritten. Zunächst wird ermittelt, welche Reiz-Reaktionsmechanismen einer bestimmten Art von Fahraufgabe (primär, sekundär etc.) zu Grunde liegen. Im zweiten Schritt erlaubt die Zuordnung der Anwendung zu einem bestimmten Reaktionsmechanismus und zur Art der Fahraufgabe eine Aussage über die Möglichkeit des Menschen, fehlende Wahrnehmungen im Simulator mental auszugleichen, um valide Ergebnisse er-

zielen zu können. Diese Zuordnung bestimmt zusammen mit der Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen die für diesen Mechanismus erforderliche Qualität und Quantität des Sinnesreizes. Es wird also ermittelt, ob und wie der dargebotene Sinnesreiz in der Simulation von dem in der Realität abweichen darf. Aus dieser Mindestanforderung werden in einem dritten Schritt das Simulatorkonzept und die erforderliche Ausführung der Technik abgeleitet.

5.1 Zusammenhang zwischen Sinnesreiz und Art der Fahraufgabe

Die Verknüpfung von Sinnesreiz und menschlicher Regelleistung beschränkt sich in der Literatur meist auf Validitätsbetrachtungen hinsichtlich der primären Fahraufgabe. Dabei wird der Einfluss eines Simulationsparameters auf einen Aspekt der primären Fahraufgabe (z.B. Bildauflösung und Geschwindigkeitsverhalten) untersucht. Da in aller Regel das Konzept der verschiedenen Simulatoren und die Ausführung der Komponenten nicht ausreichend beschrieben sind, ist eine Verallgemeinerung der gefundenen Zusammenhänge nicht möglich. Ergebnisse aus diesen Versuchen finden nur dann Eingang in die Methode, wenn sie anhand der Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen nachvollziehbar sind. Um im nächsten Schritt die Zuordnung einer Anwendung zu einer Art von Fahraufgabe zu ermöglichen, wird im Folgenden zwischen primärer Fahraufgabe mit Stabilisierung, Bahnführung und Navigation bzw. sekundärer und tertiärer Fahraufgabe unterschieden.

5.1.1 Einflussgrößen der Stabilisierungsaufgabe

Wie gut die Stabilisierungsaufgabe bewältigt werden kann, hängt von der Positions- und der Geschwindigkeitseinschätzung, also der Wahrnehmung des momentanen Fahrzustands ab. Diese Wahrnehmungen vom werden Fahrer verwendet, um mental die Größen Time-to-Collision, Sekundenabstand und Time-to-Line-Crossing zu bilden. Die Time-to-Collision beschreibt die Zeitdauer bis zur Kollision zweier Fahrzeuge unter der Annahme, dass beide ihre Fahrgeschwindigkeit und -richtung nicht verändern. Der entsprechende querdynamische Wert ist die Time-to-Line-Crossing, also die Zeit bis zum Überfahren der Fahrbahnmarkierung. Der Sekundenabstand ist ein geschwindigkeitsabhängiges Maß für die gewünschte Relativposition zum vorausfahrenden Fahrzeug. Der Fahrer wird dann in die Regelung eingreifen, wenn diese Werte den vom Fahrer bevorzugten Bereich über- oder unterschreiten. Wie gut der Fahrer dann in der Lage ist, die gewünschte Geschwindigkeits- oder Positionsänderung einzuregeln, wird durch die Charakteristika der primären Bedienelemente bestimmt. Entsprechend sind die folgenden Kapitel nach „Wahrnehmung“ bzw. „Regelung“ getrennt.

5.1.1.1 Wahrnehmung der Geschwindigkeit

Der Gesichtssinn spielt die Hauptrolle bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Da der Mensch aber allein durch den Gesichtssinn nicht immer beurteilen kann, ob er sich auf einen Gegenstand zu bewegt, oder ob sich der Gegenstand auf ihn zu bewegt, sind zusätzliche akusti-

sche und taktile Sinneseindrücke hilfreich, um eine Einschätzung des Eigenanteils an der optisch wahrgenommenen Bewegung zu erlauben. [33, 44]

Sichtsimulation und Geschwindigkeitswahrnehmung

Im Sichtsystem wird die Flächenanordnung der Objekte der Fahrumgebung, das so genannte ambient-optic-array dargestellt. Bewegt sich der Fahrer, dann verändert sich diese Flächenanordnung. Objekte, die zunächst verdeckt waren, werden sichtbar, andere werden aus veränderten Positionen wahrgenommen. Ist die Bewegung des Beobachters kontinuierlich, spricht man von optischem Fließen, was als der zentrale Prozess bei der Geschwindigkeitswahrnehmung gilt (Abbildung 5-2). [17, 43, 57]



Abbildung 5-2: „Vektorfeld“ des optischen Flusses am Beispiel des PC-Rennspiels „Burnout 3“ (211)

Eine schwache Umsetzung des optischen Flusses in der Sichtsimulation führt zu einer Unterschätzung der Geschwindigkeit im Simulator, d.h. es wird schneller gefahren als bei guter Umsetzung. Dieser Effekt wird in verschiedenen Veröffentlichungen bestätigt, indem bei sonst gleichen Randbedingungen die optischen Informationen durch Nebel oder Dunkelheit stark reduziert wurden. So fand Chatziastros, dass Probanden in einem Nachtszenario um 9% schneller fuhren als in der vergleichbaren Tag-Bedingung [20]. Obwohl das Präsenzepfinden unter einem kleinen Bildausschnitt leidet, zeigen frühe Untersuchungen, dass bereits mit Bildausschnitten zwischen 40° und 60° die Geschwindigkeitseinschätzung bei niedrigen Geschwindigkeiten bis ca. 60 km/h gut möglich ist. Für höhere Geschwindigkeitsbereiche sollte ein größerer Ausschnitt gewählt werden, um das für die Bildung des optischen Flusses nutzbare Vektorfeld zu vergrößern, [50, 79]. Aus der Tatsache, dass auch Einäugigen eine realistische Geschwindigkeitseinschätzung möglich ist, kann als weitere, maßgebliche Ausführungsstufe für Sichtsysteme ein Bildausschnitt von 120° - 140° angenommen werden, was dem Sichtfeld eines einzelnen Auges entspricht.

Die Auslegung eines Sichtsystems kann die Bildung eines Kompromisses zwischen Auflösung und Bildausschnitt erfordern. In einem Versuch wurde nachgewiesen, dass eine der Realität entsprechende Fahrgeschwindigkeit im Simulator eher eingenommen wird, wenn die Szenerie hoch aufgelöst und mit kleinem Bildausschnitt dargeboten wird als umgekehrt⁵. Obwohl die Bedienung des peripheren Sichtbereichs einen Einfluss auf die Einschätzung der Geschwindigkeit hat, trägt eine Erhöhung der Auflösung deutlicher zur Verbesserung des optischen Flusses bei als die Vergrößerung des Bildausschnitts [4, 50].

Bei schneller Fahrt wird aus physiologischen und psychologischen Gründen das Gesichtsfeld eingengt und der sog. Fixationspunkt, auf den der Fahrer zur korrekten Spurhaltung seinen Blick hauptsächlich richtet, wandert in die Ferne [44]. Obwohl die Bewegungswahrnehmung im peripheren Sichtbereich besonders gut ausgeprägt ist, wird deshalb bei hohen Geschwindigkeiten die Bedeutung des peripheren Sehens zur Geschwindigkeitseinschätzung geringer. Bei einer Vergrößerung des horizontalen Sichtbereichs auf über 140° wird daher der Nutzen für die Geschwindigkeitswahrnehmung unterproportional zum Aufwand sein, da der optische Fluss nicht vorrangig im äußersten peripheren Sichtbereich erzeugt wird.

Wird bei höheren Geschwindigkeiten ein geringer Augabstand gewählt, so ist mit einem unterbewussten Wahrnehmungskonflikt zu rechnen, da aus der Realfahrt die Akkomodation auf den weit entfernten Fixationspunkt bekannt ist. Das binokulare Sehen spielt für die Geschwindigkeitswahrnehmung eine untergeordnete Rolle. [44, 71]

Datenbasis und Geschwindigkeitswahrnehmung

Für die gute Ausprägung des optischen Flusses ist die hochwertige Ausführung der Datenbasis im Sinne der qualitativen und quantitativen Übereinstimmung des Informationsgehaltes mit der Realität von großer Bedeutung. Die Geschwindigkeitsschätzung im Simulatorversuch ist ohne ruhende Bezugspunkte mit größeren Fehlern behaftet als wenn diese vorhanden sind. Dies gilt hinsichtlich der Stabilisierungsaufgabe in erster Linie für die Fahrbahn und deren nähere Umgebung in Form von Leitpfosten, Fahrbahnmarkierungen, Bordsteinen und Begrünungen. Dabei spielt das Mitwandern des Blickes mit den Bezugspunkten eine Rolle, wobei viele Bezugspunkte den Geschwindigkeitseindruck erhöhen [28]. Dieser Umstand spiegelt sich auch bei der Realfahrt wieder, indem auf bezugspunktarmen Straßen, wie z.B. Autobahnen, die gleiche Geschwindigkeit niedriger eingeschätzt wird als in einer bezugspunktreichen Stadtstrecke.

Für eine gute Geschwindigkeitswahrnehmung ist zudem die Verwendung detailreicher Texturen v.a. für die Straßenoberfläche und den fahrbahnnahen Bereich erforderlich, da damit das für den optischen Fluss erforderliche Geschwindigkeitsvektorfeld im Hauptsichtbereich verbessert wird. Die realistische Gestaltung der Fahrbahnbreiten, Kurvenradien und -verläufe liefert weitere mit der Realfahrt übereinstimmende Wahrnehmungen. [44, 71]

⁵ Aufbau 1: 1280*1024 Pixel, 50° vert. Sichtbereich, Aufbau 2: 960*620 Pixel, 120° vert. Sichtbereich [50]

Geräuschsimulation und Geschwindigkeitswahrnehmung

Experimente im Realfahrzeug belegen die entscheidende Rolle des Gehörs bei der Einschätzung der absoluten eigenen Geschwindigkeit. Es wurde experimentell nachgewiesen, dass der Schätzfehler der Geschwindigkeit bei Beteiligung aller Sinne zwischen 5 und 8% lag. Wurde dagegen die akustische Komponente durch Ausschaltung des Gehörsinns eliminiert, stieg der Schätzfehler auf 25-30% an [44]. Hier sind geschwindigkeitsabhängige Geräusche wie Wind-, oder Abrollgeräusche, aber auch Vorrichtungen zur Erzeugung geschwindigkeitsabhängiger Vibrationen, z.B. durch Körperschallwandler, förderlich. Panerai belegt in einer Studie, dass auch im Simulator die Darstellung der fahrzustandsabhängigen Geräusche zu einer gleichmäßigeren Einhaltung der Geschwindigkeit und zu einem verbesserten Brems- und Beschleunigungsverhalten beiträgt [79].

Aus der Realfahrt ist dem Fahrer der von der Differenzgeschwindigkeit abhängige Dopplereffekt bekannt. Zusammen mit der maßstabsgetreuen optischen Nachbildung des Gegenverkehrs kann hier ein zusätzliches, absolutes Maß für die Geschwindigkeitseinschätzung erzeugt werden.

Bewegungssimulation und Geschwindigkeitswahrnehmung

Das Bewegungssystem kann einen Beitrag zur Geschwindigkeitswahrnehmung liefern, da auch epikritische Informationen benutzt werden, um die Fahrgeschwindigkeit anzupassen. So wird auf einer Schlechtwegstrecke mit der dauernden Änderung der Druckempfindungen im Sitz der Fahrer seine Geschwindigkeit eher drosseln, während er ohne diese Reizänderungen eher schneller fahren wird. Voraussetzung für die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist die Übereinstimmung der epikritischen Informationen mit denen der Sichtsimulation. Es ist nur dann sinnvoll, dieses Merkmal in der Simulation zu implementieren, wenn es eine optische Entsprechung der Vertikaldynamik in der Sichtsimulation gibt. Ohne diese Plausibilisierung der Vertikaldynamik wird es zu einer Irritation des Fahrers kommen.

Für die Wahrnehmung der Geschwindigkeit bei querdynamischen Manövern ist die Bewegungssimulation nur durch die indirekte Wahrnehmung über die Querbeschleunigung von Bedeutung, die aber nur bei unskaliertem Darstellung eine realistische Einschätzung erlaubt [95].

5.1.1.2 Wahrnehmung der Position

Die Wahrnehmung der Ist-Position als Basis für den kompensatorischen Anteil des Lenkverhaltens geschieht ausschließlich mittels des Gesichtssinns und beruht auf der korrekten Abstandseinschätzung. Als wichtigste Anforderung an die Sichtsimulation kann daher eine möglichst hohe Auflösung von 2-3 Bogenminuten/Pixel und die realitätsnah und richtig skalierte Ausgestaltung der näheren Umgebung der Fahrbahn gelten.

Wie gezeigt, spielt im Nahbereich bis zu 10m der durch das binokulare Sehen bedingte stereoskopische Effekt die zentrale Rolle für die Tiefenwahrnehmung. Zudem zeigen Versuche, dass Fahrer ihr Fahrzeug eher in einem mit der Realität übereinstimmenden Abstand zum Stra-

ßenrand halten, wenn bei gleichem vertikalem Sichtbereich ein breiterer Ausschnitt aus der Szenerie dargeboten wird [17]. Aus diesen beiden Tatsachen kann abgeleitet werden, dass die mittels stereoskopischer Effekte verbesserte Abbildung des für die Stabilisierung relevanten, peripheren Nahbereichs und die Vergrößerung des horizontalen Bildausschnitts einen Zugewinn für die Qualität der Stabilisierungsaufgabe erbringt. Ebenso wird der Effekt der Bewegungsparallaxe als hilfreich für die Abstandseinschätzung und damit für die Spurhaltung beschrieben [79].

Neben der Einschätzung des Abstandes ist auch die Wahrnehmung der Abweichung vom mental definierten Soll-Kurs ausschlaggebend. Donges [28] findet dafür 3 optische Kriterien, die die Fahrbahn und die nähere Umgebung des Fahrzeugs betreffen. Dabei ist der Gierwinkelfehler, also die Abweichung zwischen Fahrzeuglängsachse und der Tangente an den mental gebildeten Soll-Kurs das bei weitem bedeutendste. Danach folgen die Krümmungsdifferenz zwischen Soll- und Ist-Kurs und die Querabweichung vom Soll-Kurs. Bei wachsenden Geschwindigkeiten steigt der Einfluss der Krümmungsdifferenz. Gestaltungselemente, die die Wahrnehmung der Fahrzeuglängsachse betonen, sind demnach ebenso wie Markierungen und Leitlinien auf der Straße dazu geeignet, den optischen Eindruck des Straßenverlaufs und damit die Wahrnehmung des Gierwinkelfehlers zu verbessern. Die Darstellung der Krümmungsdifferenz ist nur straßenseitig möglich, da sie auf der Wahrnehmung des Geschwindigkeitsvektorfeldes beruht. Für die Ausbildung des Geschwindigkeitsvektorfeldes ist eine detailreiche Texturierung der Fahrbahn und der näheren Umgebung hilfreich. Es ist vorteilhaft, grobkörnige Fahrbahnbeläge und Texturstützpunkte wie Randpfähle etc. in der Umgebung der Fahrbahn anzubringen. [65]

Für die Kurvenfahrt und den Abbiegevorgang ist die aus der Bewegung des Fahrerkopfes resultierende Veränderung der visuellen Information wichtig [71]. Es ist daher wahrscheinlich, dass auch die Implementierung von Head-tracking einen Zugewinn für die Bestimmung der Ist-Position erbringt. Versuche dazu sind bislang nicht bekannt.

Fahrzeug-Mockup und Positionswahrnehmung

Auch die Abschätzung des Abstands von Referenzpunkten an der Fahrzeugkarosserie zu den angrenzenden Bereichen der Umgebungsansicht ermöglicht eine Einschätzung der Querabweichung. Eine serienmäßige Karosserie trägt also zur Positionswahrnehmung bei. Wenn keine Karosserie sichtbar ist, ist der Fahrer darauf angewiesen, sich ein inneres Modell seines Fahrzeugs zu schaffen und so die Quer- und Längsposition gedanklich zu ermitteln, was die Ortsbestimmung schwieriger und unpräziser macht.

Eine Bestimmung der Ist-Position durch den Blick aus dem Seitenfenster wie im Realfahrzeug ist im Simulator nicht möglich, wenn kein Head-Tracking realisiert ist. Dieser Unzulänglichkeit kann im Simulator umgangen werden, indem eine Rückspiegelansicht erzeugt wird, in der Teile des eigenen Fahrzeugs sichtbar sind. Hier ist die Information über die Querposition des Fahrzeugs auf der Fahrbahn direkt enthalten. Beim LKW wird dieser Mechanismus stärker genutzt als beim PKW. Ebenso hilfreich für die Bestimmung der Ist-Position kann die Darstellung

der Motorhaube des Fahrzeugs in der Sichtsimulation sein. Auch so wird ein direkter Zusammenhang zwischen physischer Realität und virtueller Datenbasis erzeugt.

5.1.1.3 Regelung von Geschwindigkeit und Kurs

Veröffentlichungen zeigen, dass die Güte der Brems- und Beschleunigungsreaktion durch die Verbesserung des vestibulären Informationsangebots kontinuierlich an die reale Reaktion angenähert werden kann [9]. Ebenso wird deutlich, dass mit den bislang bekannten Bewegungssystemen eine vollständige Nachbildung der realen Beschleunigungen und damit eine „natürliche“ Brems- und Beschleunigungsreaktion nicht zu erzielen ist [44].

Sichtsimulation und Fahrzeugstabilisierung

Unabhängig von der Existenz eines Bewegungssystems wird im Fahrsimulator eine Bremsung später eingeleitet als in der Realfahrt [11]. Der systematisch spätere Bremsbeginn konnte auch am FTM-Fahrsimulator nachgewiesen werden (s. Kapitel 6.2.1). Die Ergebnisse wurden durch einen Vergleich zwischen Realfahrt und Simulatorfahrt unter nahezu identischen Randbedingungen durchgeführt. Den auslösenden Sinnesreiz für das Einleiten einer Bremsung liefert demnach ausschließlich die optische Wahrnehmung. Der spätere Bremsbeginn deutet darauf hin, dass das Sichtsystem nicht das gleiche Informationsangebot liefert, wie die Realfahrt. Eine Verbesserung der Abstandswahrnehmung durch eine Erhöhung der Auflösung wird hier eine Angleichung des Verhaltens an die Realität bringen.

Die Anforderungen an die Sichtsimulation aus der Regelung der Querführung beschränken sich auf die verzögerungsfreie und präzise Visualisierung der Fahrzeugreaktion bei einer Lenkeingabe. Dafür ist neben einer hohen Bildberechnungsrate auch ein Projektor erforderlich, der das Bild nicht verwischen lässt, wie dies bei LCD-Projektoren der Fall sein kann.

Fahrdynamikmodell und Fahrzeugstabilisierung

Für den kompensatorischen Soll-Ist-Abgleich ist die korrekte und verzögerungsfreie Darstellung der Fahrzeugposition im Sichtsystem erforderlich. Daneben sind die vom Fahrdynamikmodell berechneten Fahrzeugbewegungen die Grundlage für die Ansteuerung des Bewegungssystems. Entsprechend hoch sind für die primäre Fahraufgabe die Anforderungen an die Realitätsnähe des Fahrdynamikmodells. Soll das Regelverhalten verbessert werden, kann durch die Berechnung der Nickbewegung des Aufbaus eine sinnvolle Zusatzinformation durch das Bewegungssystem erzeugt werden. Die Aufbaubewegung korrespondiert mit der Pedalbetätigung und kann durch ein Bewegungssystem mit einem rotatorischen Freiheitsgrad schnell und unverfälscht dargestellt werden. Einspurmodelle beinhalten nicht die erforderlichen Freiheitsgrade der Aufbaubewegung, weshalb für Untersuchungen zur primären Fahraufgabe Zweispurmodelle oder MKS-Modelle einzusetzen sind. [17]

Fahrzeug-Mockup und Fahrzeugstabilisierung

Realitätsnahe haptische Informationen an Fahr- und Bremspedal sind für die Geschwindigkeitsregelung sehr wichtig, da die Glieder Bewegungen vollführen müssen, die sich der Kontrolle durch den optischen Sinn entziehen. Künstlich herbeigeführte Ausschaltung der haptischen Sinne im Experiment durch lokale Narkotisierung führen zu einer erheblichen Verschlechterung der Beurteilung der Stellung und Bewegung des Gelenks bzw. der Gliedmaße und somit zu einer schlechteren Regelung [44]. Da Fahrpedal und Bremspedal charakteristisch für verschiedene Fahrzeugtypen sein können, lohnt hier die Messung und Nachbildung der realen Kräfte, zumal dies mit relativ geringem Aufwand möglich ist.

Das Lenkmoment kann bei der Fahrt im Simulator zwei Aufgaben übernehmen. Dies ist zum einen eine unterstützende Funktion zur robusten Regelung des Lenkwinkels durch ein kontinuierlich mit dem Lenkwinkel sich erhöhendes Moment. Ein solches, einfaches Lenkmoment ist demnach auch die erste sinnvolle Ausbaustufe. Zum anderen eignet sich der Proband im Verlauf einer Fahrt ein inneres Modell des dynamischen Verhaltens des Fahrzeugs an, welches ihm erlaubt, die Reaktion des Fahrzeugs in Abhängigkeit seiner Lenkeingabe vorausszusehen. Die Bildung dieses Modells kann alleine durch optische Informationen vor sich gehen, wird aber durch ein haptisches Feedback stark beschleunigt, was sich in Experimenten mit einer dem Probanden unbekanntem Regelaufgabe gezeigt hat. Wenn das Lenkmoment also in Zusammenhang zur Fahrdynamik steht, so hilft es das innere Modell des Fahrzeugverhaltens und somit die Antizipation zu verbessern. Die Studie legt nahe, dass dabei vorrangig die Qualität und nicht die Quantität des Lenkmoments Ausschlag gebend ist. [44, 98]

Bewegungssimulation und querdynamische Regelung

Über die Auswirkungen von Bewegungsinformation auf das quer- und längsdynamische Regelverhalten sind viele Veröffentlichungen bekannt [95, 98]. Sie enthalten zum Teil Angaben über die technischen Daten des Bewegungssystems und über die verwendeten Skalierungsfaktoren, die aber ohne die tatsächliche Messung der auftretenden Beschleunigungen für die Ermittlung quantitativer Zusammenhänge nicht verwertbar sind. Im Folgenden sind die übereinstimmend gefundenen Aussagen zusammengefasst.

Qualitativ richtige Bewegungsinformationen wirken sich positiv auf das längs- und querdynamische Regelverhalten aus. Bewegungsinformationen liefern ein Maß für die Geschwindigkeit mit der Kurven durchfahren werden, aber vor allem eine Rückmeldung über die Gleichmäßigkeit der Kurvenfahrt, sodass die Spurhaltung besser gelingt und eher dem realen Verhalten entspricht [12]. Die positiven Auswirkungen drücken sich in einer Verringerung der Varianz der Regelgröße aus. Das Subjektivurteil der Fahrer fällt dabei aber je nach Fahrmanöver unterschiedlich aus. Während bei Kurvenfahrt das Fehlen von Bewegungsinformation als stark störend angesehen wird, trifft dies bei Geradeausfahrten nicht zu. [17, 95]

Mit steigender Dynamik der Fahrsituationen nehmen die negativen Auswirkungen der von der Realität abweichenden Bewegungsinformation zu. Als Effekt wird beobachtet, dass in diesen Situationen zunächst ein deutlich höherer Lenkwinkel gestellt wird, als in der realen Situation, da

der Fahrer versucht, die aus der Realfahrt gewohnte Höhe der Querschleunigung zu erzeugen. Eine Übereinstimmung kann lediglich in der Anfangsphase der Reaktion beobachtet werden, da hier der Regelkreis über die Wahrnehmung der Querschleunigung noch nicht geschlossen ist und es sich eigentlich um einen Steuervorgang handelt. [17, 21, 50]

Versuche zum Spurwechselverhalten zeigen, dass der Haupteffekt durch das reine Vorhandensein qualitativ richtiger Bewegungsinformation erzielt wird. Ob eine Skalierung erfolgt, ist dabei zunächst sekundär. Die Zusammenhänge bei Kurvenfahrt gelten auch für Abbiegevorgänge, weshalb Probanden in statischen Simulatoren häufig über unrealen Bedingungen klagen. [95]

Bewegungssimulation und längsdynamische Regelung

Die Aussagen über die Regelung der Querdynamik können auf die Längsdynamik übertragen werden. So zeigt sich, dass zwischen der Güte der längsdynamischen Bewegungsinformation und der Realitätsnähe des Bremsverhaltens ein kontinuierlicher Zusammenhang besteht. Bei Versuchen ohne Bewegungssystem treten insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten Verzögerungen auf, die erheblich höher sind als in der Realität. Das Niveau wird in verschiedenen Veröffentlichungen abhängig von der Fahrgeschwindigkeit zwischen 25 und 50% höher als in der Realität angegeben und erreicht damit oft jenes einer Notbremsung in der Realität (ca. $6-8\text{m/s}^2$). Im Fahrsimulator wird darüber hinaus die Stärke der Bremsung häufig und mit unangemessenem Kraftaufwand korrigiert und Fahrer bemängeln oftmals ein objektiv nicht gegebenes, schlechtes Ansprechen der Bremse. Gerade bei niedrigen Geschwindigkeiten ist die kinästhetische Rückmeldung von entscheidender Bedeutung und verhilft den Fahrern zu einer exakteren Längsregulation. Es zeigt sich, dass auch eine stark skalierte Simulation der Längsbeschleunigung die längsdynamische Stabilisierung verbessert. [17, 95]

Einen Beitrag zur Annäherung an das reale Bremsverhalten liefert schon die Verwendung eines Hydropulszylinders, der eine haptische Information über die Geschwindigkeit und damit auch den Geschwindigkeitsabbau als indirekte Bestimmungsgröße für die Stärke der Bremsung erzeugt. Die nächste Ausbaustufe sind Bewegungssysteme mit einem rotatorischen Freiheitsgrad um die Fahrzeugquerachse, welche die Aufbaubewegungen und ggf. länger andauernde Verzögerungen nachbilden können. Ein zusätzlicher Freiheitsgrad erbringt eine weitere Verbesserung, indem eine kurze translatorische Bewegung zu Beginn der Bremsung die starke Überhöhung der Pedalkraft zu Beginn der Betätigung vermindern kann [11, 53].

Zusammenfassend erbringt eine quantitative Verbesserung der dargestellten Bewegungsinformation eine Annäherung an das Verhalten im Realfahrzeug, wobei diese unterproportional zur Verstärkung ist. Trotz der möglichen Verbesserungen zeigen die betrachteten Veröffentlichungen, dass bei einer von der Realität abweichenden Beschleunigungsdarstellung das Regelverhalten des Fahrers nicht dem der Realität entsprechen wird. Wenn also fahrdynamische Fragestellungen untersucht werden sollen, muss das Bewegungssystem in der Lage sein, die realen Beschleunigungen darzustellen. Wenn dies für einen Teil des fahrdynamischen Spektrums gewährleistet sein soll, sind kombinierte Bewegungssysteme mit einem großen Standard-

Bewegungssystem und translatorischen Schienensystemen Stand der Technik. Vorgänge, wie das Verhalten in Schleudersituationen und Fahrverhaltenstests wie der VDA-Ausweichtest, sollten nicht im Simulator untersucht werden, wenn die unskalierte Darstellung der Beschleunigungen nicht sichergestellt werden kann [90]. Da dies auch mit großen Standard-Bewegungssystemen nicht gelingt, ist davon in der Regel abzuraten.

5.1.2 Einflussgrößen der Bahnführungsaufgabe

Für den antizipativen Anteil der primären Fahraufgabe sind die beiden Fernsinne des Menschen, also der Gesichtssinn und der Gehörsinn maßgebend. Darüber hinaus sind aber auch Informationen über den momentanen Fahrzustand erforderlich, um die Soll-Geschwindigkeit zu bilden.

5.1.2.1 Bildung der Soll-Geschwindigkeit

Es wurde generell gezeigt, dass die Strategien zur Geschwindigkeitswahl im Simulator und in der Realität vergleichbar sind [9, 17]. Die absolute Geschwindigkeit ist im Simulator in der Regel höher als bei der Realfahrt, wobei diese Aussage nicht für alle Fahrmanöver zutrifft. Allgemein wird dagegen im Simulator eine deutlich höhere Varianz der Geschwindigkeit beobachtet, was aber auf die beschriebenen Effekte der Stabilisierungsebene zurückzuführen ist.

Sichtsimulation, Datenbasis und Bildung der Soll-Geschwindigkeit

Die Bildung der Soll-Geschwindigkeit basiert auf der optischen Einschätzung des Abstands zu den Objekten der Umgebung. Daraus werden zusammen mit der Einschätzung der Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs mental die entscheidungsorientierten, längsdynamischen Parameter Sekundenabstand und Time-To-Collision gebildet. Hier fließen Informationen über den momentanen Fahrzustand in die Festlegung einer neuen Soll-Geschwindigkeit ein. Entscheidend für den Vorgang sind also Abstands- und Geschwindigkeitseinschätzung, mit dem entsprechenden Anforderungsprofil, wie bereits von der Stabilisierungsaufgabe her bekannt (Kapitel 5.1.1.3). Aufgrund der Inhalte der Bahnführungsaufgabe können aber zusätzliche Anforderungen an Sichtsimation und Datenbasis gestellt werden [9, 51, 99]:

- Die Antizipation erfordert eine weitere Vorausschau als die Spurhaltung, da jetzt auch Objekte in größerer Entfernung mit in den Regelvorgang mit einbezogen werden. Die Datenbasis sollte demnach auch in der weiteren Umgebung der Fahrbahn merkmalsreich und realitätsnah ausgestaltet sein.
- Die Anforderungen an die Bildauflösung sind im Vergleich zur Stabilisierung noch höher, da auch weiter entfernte Objekte schnell und deutlich zu erkennen sein sollen.
- Der Vorgang der Bahnführung ist zum großen Teil regelbasiert, weshalb ein gutes Präsenzepfinden wichtiger ist als bei der Stabilisierungsaufgabe. Ein größerer horizontaler Bildausschnitt in Form einer Voll- oder Rundumsicht ist daher empfehlenswert.

- Für die Bildung einer angemessenen Soll-Geschwindigkeit spielen in der Realität auch Witterungseinflüsse und die Einschätzung über die Griffigkeit des Fahrbahnbelags eine Rolle, was in der Spezifikation der Datenbasis zu berücksichtigen ist.

Stereoskopische Effekte der Tiefenwahrnehmung spielen für die Antizipation eine untergeordnete Rolle, da sich die wesentlichen Informationen im Bereich von mehr als 10m befinden und Stereosehen bei diesen Betrachtungsdistanzen keine Relevanz mehr besitzt. Es kann daher angenommen werden, dass stereoskopische Sichtsimulationen einen geringen Zugewinn an Tiefeninformation und daher auch einen geringen positiven Einfluss auf das antizipatorische Verhalten haben. Gleiches gilt für die Implementierung von Head-Tracking.

Bewegungs- bzw. Geräuschsimulation und Bildung der Soll-Geschwindigkeit

Haptische und vestibuläre Informationen haben außer durch die Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung mittels Schwingungen und Vibrationen keinen Einfluss auf die Planung der Soll-Geschwindigkeit. Die Anforderungen an die Bewegungssimulation resultieren allein aus der Tatsache, dass die Bahnführungsaufgabe nie isoliert ohne die Fahrzeugstabilisierung auftreten kann. Die realitätsnahe Verteilung der Beanspruchung des Fahrers zwischen diesen beiden Aufgaben erfordert daher eine ausreichend gute Stabilisierungsaufgabe, um die Abläufe der Bahnführung zu ermöglichen. Da aber nicht die Fahrdynamik im Vordergrund steht, ist eine Bewegungssimulation mit hohen Skalierungsfaktoren ausreichend. Als Anforderung an die Bewegungssimulation ist daher die Realisierung von sechs Freiheitsgraden für die Aufbaubewegungen und eine zumindest rudimentäre Nachbildung translatorischer Hinweisreize abzuleiten.

Fahrzeug-Mockup und Bildung der Soll-Geschwindigkeit

Das Fahrzeug-Mockup bestimmt die Erwartungshaltung an Fahrdynamik und Fahrleistung. Ein Vollfahrzeug oder ein Serienfahrzeug ist deshalb für die realitätsnahe Planung der gewünschten Verzögerungen und Querbeschleunigungen empfehlenswert.

Verkehrssimulation und Bildung der Soll-Geschwindigkeit

Bei Längs- und Querführung wirkt sich das Vorhandensein von Fahrzeugen der Verkehrssimulation positiv auf die absolute Höhe und die Varianz der Regelgrößen aus, indem es die Bildung von Sekundenabstand und Time-to-Collision unterstützt. Bewegte Fahrzeuge bieten einen zusätzlichen Anhaltspunkt zur mentalen Erzeugung dieser Größen. [17] Für die antizipatorische Steuerungsaufgabe ist also die Ausgestaltung der Datenbasis mit einer Verkehrssimulation wichtig.

5.1.2.2 Bildung des Soll-Kurses

Wie bei der Regelung der Längsdynamik bildet der Fahrer aus der Führungsgröße des Fahrbahnverlaufs einen Soll-Kurs. Die mental gebildete Größe, die dieser Handlung zu Grunde liegt, ist die Time-to-Line-Crossing. Wenn absehbar wird, dass bei der Ist-Geschwindigkeit und dem

momentanen Lenkeinschlag die vom Fahrer gewünschte Time-to-Line-Crossing unterschritten wird, so wird eine Lenkbewegung eingeleitet.

Sichtsimulation und Bildung des Soll-Kurses

Der Prozess der Querregelung beruht bei Geradeausfahrt und bei Kurvenfahrt auf unterschiedlichen Mechanismen und ist in Kurvenfahrt komplizierter als bei Geradeausfahrt. Bei Geradeausfahrt konzentriert sich der Fahrerblick meist auf das Zentrum der Expansion des optischen Flusses, den so genannte Fixationspunkt. Die Bildung des Time-to-Line-Crossing-Wertes und damit die Spurhaltung bei Geradeausfahrt werden durch die Verbesserung des optischen Flusses mittels fein ausgestalteter Texturen oder geeigneter Objekte der näheren Fahrumgebung positiv beeinflusst [20]. Bei Kurvenfahrt hingegen wechselt der Blick zwischen den Fahrbahnkanten der Kurve und der Fahrbahnmitte vor dem Fahrzeug. Mit geringer werdendem Kurvenradius wird daher der horizontale Bildausschnitt wichtiger. Die Planung und Ausführung eines Abbiegevorgangs als das Manöver mit dem geringsten Kurvenradius ist ohne eine Vollsichtsimulation nicht realitätsnah möglich. Eine Studie zeigt dagegen für die Spurhaltung bei Geradeausfahrt, dass selbst ein von 40° auf 180° vergrößerter horizontaler Bildausschnitt nur geringe Auswirkungen hat [17, 71]. Es kann daher die Implementierung einer Voll- oder Rundumsicht empfohlen werden, wenn Bahnführungsaufgaben untersucht werden sollen.

Für die anderen Simulatorkomponenten gelten analog die Anforderungen aus Kapitel 5.1.2.1.

5.1.3 Einflussgrößen sekundärer Aufgaben

Den sekundären Aspekten der Fahraufgabe wird in der Literatur wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Dort bildet die Nachbildung der Stabilisierungsaufgabe die Basis für die Validität von Ergebnissen bei Untersuchungen hinsichtlich sekundärer und tertiärer Aufgaben. Neben diesem Aspekt soll hier auch betrachtet werden, wie die Validität sekundärer und tertiärer Aufgabenerfüllung im Simulator isoliert verbessert werden kann.

Qualität der Stabilisierungsaufgabe

Greenberg et al [41] zeigen, dass bei sinkender Qualität der Simulation der Stabilisierungsaufgabe z.B. durch fehlende Bewegungsinformationen die gleiche Nebenaufgabe zu einer schlechteren Erfüllung der Stabilisierungsaufgabe im Sinne der Querführung führt. Haptische und vestibuläre Informationen werden umso wichtiger, je mehr visuelle Aufmerksamkeit durch die Nebenaufgabe beansprucht wird. In Simulatoren ohne Bewegungssystem werden größere Fehler hinsichtlich Spurführung und Gierwinkelfehler beobachtet [28]. Umgekehrt kann geschlossen werden, dass eine stark von der Realität abweichende primäre Fahraufgabe die mentale Beanspruchung des Fahrers so verändert, dass die Ausübung sekundärer Aufgaben stark beeinflusst wird. Bei den in der Fahrzeugtechnik üblichen Variantentests kann aber auch eine weniger realitätsnah simulierte Stabilisierungsaufgabe ausreichend sein, da meist nur eine Relativbeurteilung verschiedener Varianten angestrebt wird.

Wenn dagegen Fragen zur Akzeptanz oder zur absoluten Höhe der Fahrerbelastung untersucht werden, gilt dies nicht mehr und es können unerwünschte Effekte auftreten. Bei einem sehr hohen Maß an Belastung durch Fahraufgabe und Nebentätigkeiten kann die Akzeptanz der Fahrer nachlassen, sich längere Zeit dieser Belastung auszusetzen. Dies kann sich in einer veränderten Beurteilung der Gesamtsituation und damit zu Fehlurteilen über den eigentlichen Untersuchungsgegenstand führen. Wenn es sich um nicht sehr gut trainierte Probanden handelt, ist aufgrund der durch die Belastung resultierenden Anspannung auch mit einer erhöhten Anfälligkeit für die Simulatorkrankheit zu rechnen und es kann zu einer Fehlbeurteilung über die zumutbare Gesamtbelastung durch Fahraufgabe und Nebentätigkeit kommen. Der Fahrer wird zudem versuchen, die Situationen zu vermeiden, die sein Unwohlsein auslösen. Er wird seine Längs- und Querregelung anpassen und damit in seinem Verhalten weiter von der Realfahrt abweichen.

Grundsätzlich steht hier aber die beschwerdefreie Normalfahrt und nicht möglichst realitätsnahe Nachbildung der Fahrdynamik im Mittelpunkt der Anlagenkonzipierung. Für die Untersuchung sekundärer Aufgaben im Fahrzeug sollte daher die Stabilisierungsaufgabe so nachgebildet werden, dass eine länger dauernde Normalfahrt problemlos möglich ist. Die Stabilisierungsaufgabe sollte schnell erlernbar sein, das Präsenzepfinden sollte gut ausgeprägt sein. Die Bedeutung für die Einzelkomponenten wird im Folgenden beschrieben.

Sichtsystem und sekundäre Aufgaben

In der Realfahrt wird beim Wechsel der Blickzuwendung von den Anzeigen des Fahrzeugs zur Fahrumgebung die Akkomodation des Fahrerauges vom Nah- auf den Fernbereich erforderlich. Dieser Effekt bildet einen starken Erfahrungswert und ist daher besonders bei der Untersuchung sekundärer Aufgabenstellungen, wie z.B. zum Thema Fahrerassistenzsysteme nachzubilden. Physiologisch gesehen ist das Auge ab einem Abstand von etwa 5m komplett entspannt. Auch ein Abstand von 2,5-3m wird aber als ausreichend angegeben, um den Effekt deutlich zu erzielen (ca. 90%). Kritisch für diese Anwendungen sind Sichtsysteme mit sehr kleinen Augabständen zu sehen, bei denen das Bildmedium ggf. näher als der Nahpunkt liegt, der bei älteren Menschen und Menschen mit Akkomodationsschwäche im Bereich von 0,5-0,8m liegen kann.

Damit die Fahrsimulation möglichst schnell ein gutes Präsenzepfinden erzeugt, ist eine Vollsicht, oder eine Rundumsicht zu realisieren [20, 50]. Edge-Blending ist erforderlich, da der horizontale Bildbereich keine Nahtstellen enthalten darf. In der subjektiven Beurteilung des FTM-Simulators hat sich gezeigt, dass der Blick aus dem Seitenfenster auf den Boden der Versuchshalle und den Unterbau der Projektion als störend empfunden wird. Dieser Umstand wird verschärft, wenn Relativbewegungen gegenüber dem Untergrund wahrgenommen werden. Es kann als Anforderung abgeleitet werden, dass nicht bewegte Bereiche für den Fahrer möglichst nicht sichtbar sein sollen. Wenn das nicht vermieden werden kann, sollte der Bereich möglichst merkmalsarm, schwach beleuchtet, aber nicht abgedunkelt und farblich ähnlich einer Straßenoberfläche ausgeführt werden.

Da der Blickwechsel zwischen Fahrzeug und Umgebung kennzeichnend für die Anwendung ist, sollte in der Frontsicht eine schnelle, zuverlässige Erkennbarkeit der Objekte gewährleistet sein. Eine Auflösung von 2-3 Bogenminuten/Pixel ist daher anzustreben. Stereosehen und Head-Tracking sind nicht erforderlich.

Bewegungssystem und Geräuschsimulation bei sekundären Aufgaben

Außergewöhnliche Schwingungen hinsichtlich Amplitude, Frequenz oder Diskontinuität können zu erhöhter Aufmerksamkeit und bei geübten Fahrern zu regelbasierten Reaktionen wie z.B. dem Treten der Kupplung bei Stößen des absterbenden Motors führen. Neben solchen Sonderereignissen geben motorinduzierte, gleichmäßige Vibrationen zusammen mit der Geräuschsimulation dem Fahrer Aufschluss über die Motordrehzahl, was den Schaltvorgang beeinflusst. [44] Weiterhin sind Bewegungsinformationen hilfreich, wenn Akzeptanz und Bedienung längs- bzw. querdynamischer Regelsysteme untersucht werden. Ein Standard Bewegungssystem mit geringen Verfahrwegen ist dafür ausreichend.

Fahrzeug-Mockup und sekundäre Aufgaben

Viele sekundäre Bedienelemente, Anzeigen und Funktionen sind bei Kraftfahrzeugen weitestgehend einheitlich ausgelegt und platziert. Wenn möglich, sollten auch kleine Abweichungen wie ein nicht funktionierendes Gurtschloss oder das fehlende Rastgefühl der Handbremse vermieden werden. Auch wenn die betroffenen Elemente nicht Gegenstand der Untersuchung sind, wird dadurch das Gefühl in einem echten Fahrzeug zu sitzen, erheblich gestört [203].

In vielen Fahrsimulatoren ist eine Abdunkelung des Projektionsraumes wichtig, um das für die Projektion notwendige Kontrastverhältnis zur Umgebung zu realisieren. Als Folge ist auch der Fahrzeuginnenraum stark abgedunkelt bzw. durch die Einstrahlung der Projektion ungleichmäßig ausgeleuchtet. Dies macht zum Teil den positiven Beitrag eines serienmäßigen Mockups zum Präsenzepfinden zunichte, da der Fahrer Teile der Bedienlandschaft nur schlecht sehen kann. Unsicherheit und Desorientierung in der abgedunkelten Fahrerkabine trotz eigentlich vertrauter Bedienumgebung können die Folge sein. Zudem ergibt sich eine Diskrepanz zwischen der Wahrnehmung einer Tagfahrt in der Außensicht und Nachtfahrtverhältnissen im Fahrzeuginnenraum. Eine gleichmäßige, wenig lichtstarke Beleuchtung des gesamten Fahrzeuginnenraums wird sich als sehr förderlich für das Präsenzepfinden erweisen, ohne das angestrebte Helligkeitsverhältnis negativ zu beeinflussen.

5.1.4 Einflussgrößen tertiärer Aufgaben

Grundsätzlich gelten die für die sekundären Aufgaben gefundenen Anforderungen. Da die Aufgabenstellung aber nicht mehr mit der Fahraufgabe in Verbindung steht, sind weitere Abweichungen hinsichtlich der Stabilisierungsaufgabe zulässig. Es wäre auch denkbar, eine anders geartete Nachführaufgabe zur Erzeugung der Grundbelastung zu verwenden. Ein Fahrsimulator ist nur dann unentbehrlich, wenn die Nebenaufgabe im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem

Fahrer-Fahrzeug-Umwelt betrachtet werden soll (z.B. Navigationssysteme). Für die Fahrsimulation sprechen mehrere Gründe:

- Die Regelaufgabe „Fahrzeugfahrt“ muss nicht erlernt werden.
- Mit der Fahrsimulation kann eine der Normalfahrt gut entsprechende Grundbelastung erzeugt und variiert werden.
- Der gedankliche Transfer des getesteten Systems in eine reale Fahrumgebung fällt leichter. In die Bewertungen fließt schon eine erste Einschätzung über die Tauglichkeit des Systems bei der realen Fahraufgabe ein.

Für die Untersuchung von tertiären Aufgaben wird im nachfolgend beschriebenen Ansatz ein eigenes Simulatorprofil abgeleitet. Die Bedeutung der einzelnen Simulatorkomponenten wird dort ausführlich beschreiben.

5.1.5 Personenabhängige Einflussgrößen

Ein Spezifikum des Straßenverkehrs ist die Interaktion mit einer Vielzahl von anderen Mensch-Maschine-Systemen. Handeln im Verkehr ist deshalb auch soziales Handeln. Viele Verhaltensweisen im Straßenverkehr erfolgen aufgrund sozialer Konventionen, die in einem Fahrsimulator nicht gegeben sind. Der Begriff des Präsenzepfindens als den Grad des sich Einlassens auf die virtuelle Umgebung spielt daher auch für die personenabhängigen Einflüsse eine große Rolle. [17, 51, 83]

Studien, z.B. mit Expositionstraining in Flugsimulatoren gegen Flugangst, zeigen, dass das Einlassen von Probanden auf virtuelle Welten grundsätzlich möglich ist, aber empfindlich von der Motivation und dem sozialem Umfeld abhängen.

Diese Einflüsse sind für das Verhalten von Versuchspersonen eine große Quelle von Varianz innerhalb einer Versuchsreihe und gegenüber dem Verhalten im realen Verkehr. Maßnahmen, die zur Verringerung dieser Varianz getroffen werden, können sich zudem bei verschiedenen Personen unterschiedlich stark auswirken, was nicht quantifiziert und deshalb auch nicht egalisiert werden kann.

Für jegliche Art von Simulatorexperiment gilt daher, dass Untersuchungen bei möglichst eng definierten Randbedingungen stattfinden sollten. Im Folgenden sind die bekannten Fakten über diese Einflussgrößen zusammengetragen und hinsichtlich der Relevanz für die Anlagenkonzipierung bewertet worden. Die Parameter können nicht oder nur in geringem Umfang durch die Simulatortechnik beeinflusst werden, sondern betreffen meist die Versuchsvorbereitung und die Durchführung. Sie sind hier aufgeführt, um ein Bewusstsein für das Verhältnis deterministischer und nicht deterministischer Einflüsse zu schaffen.

Fahrerfahrung im Simulator und im Realfahrzeug

Der Fahrer wird besonders im ersten Umgang mit dem Simulator Schwierigkeiten haben, die primäre Fahraufgabe in gewohnter Art und Weise zu absolvieren. Die Adaptation des Probanden

an die psychophysikalischen Gegebenheiten der primären Fahraufgabe in der Fahrsimulation trägt sehr zu validen Ergebnissen bei. Es sollte daher unbedingt eine Eingewöhnungsfahrt oder ein eigenes Training vor der eigentlichen Untersuchung stattfinden. Dieser Aspekt wird aus Zeit- oder Kostengründen oftmals vernachlässigt. [17]

Erfahrene Fahrer im Realfahrzeug müssen den Standardaufgaben der Stabilisierung weniger Aufmerksamkeit widmen als Fahranfänger. Da diese Handlungen im Fahrsimulator auf der Basis verzerrter Führungsgrößen erfolgen und somit schwieriger sind, treten Leistungsunterschiede zwischen erfahrenen und unerfahrenen Fahrern im Simulator deutlicher zu Tage. Dieser Effekt kann zur Erhöhung der Trennschärfe von Versuchsergebnissen hilfreich sein, ist aber meist nur eine zusätzliche Quelle der Varianz. Der Effekt sollte in der Stichprobenszusammensetzung berücksichtigt werden. [79]

Nichtsimulierbarkeit des existenziellen Engagements

Bei der Fahrt im Simulator fehlt das Gefühl der wirklichen Gefährdung, die Fahrt erhält einen spielerischen Charakter. Dies allein kann schon – ohne die physikalischen Unzulänglichkeiten der Simulationsumgebung – zu von der Realität stark abweichenden Fahrgeschwindigkeiten und Spurhaltung führen. Kollisionen oder Spurverlassen werden nicht als gefährlich wahrgenommen [18]. Ein Ansatz zur Schaffung des Risikobewusstseins ist die Einführung von Stressoren bei einem Fehlverhalten. Die „Bestrafung“ des Probanden durch unangenehme Geräusche, Bewegungen und Lenkreaktionen beim Verlassen der Straße und bei Kollisionen können dazu ebenso beitragen, wie die realitätsnahe Modellierung der Fahrzeugreaktionen bei überhöhter Geschwindigkeit und deren Darstellung im Sichtsystem (z.B. Schleudern).

Es ist allerdings auch denkbar, dass der Proband durch das Wissen, in einem komplexen technischen System zu handeln, ängstlich und übervorsichtig reagiert. Dieser Effekt kann durch die Klärung der Aufgabenstellung und eine Einweisung in die Simulatortechnik vermindert werden.

Der Handlungsdruck in realen Verkehrssituationen durch das Bewusstsein, andere Verkehrsteilnehmer zu behindern oder Gefährdungen zu verursachen, ist im Simulator nur schwach ausgebildet. Es wird beschrieben, dass die Implementierung einer Verkehrssimulation zu einer realistischeren Gefahrwahrnehmung beiträgt, indem Fehlverhalten zu einer aus der Realfahrt bekannten, ungewollten Annäherung führt. [17]

Versuchsleiter und politische Korrektheit

Hier spielen nach der Erfahrung am FTM-Simulator vor allem der Wunsch des Probanden, „richtig“ zu handeln und „eine gute Figur zu machen“ eine Rolle. Die Toleranz gegenüber Fehlfunktionen des zu testenden Systems kann dadurch größer werden, Kritik wird weniger eindeutig und abgemildert geäußert. Das Verhalten der Probanden kann zudem stark von seiner Haltung und ggf. seinem Abhängigkeitsverhältnis gegenüber der testenden Institution bestimmt sein. Hinweise zur Verminderung dieser Einflüsse sind in den „Richtlinien zur Untersuchungsplanung und Versuchsleiterverhalten“ dokumentiert [14].

Monetäre Einflüsse

Fahrer, welche zum ersten Mal an Simulatorversuchen teilnehmen, sind sich oftmals nicht im Klaren darüber, was im Gegenzug für die Aufwandsentschädigung von Ihnen erwartet wird. Sowohl eine zu niedrige als auch eine zu hohe Bezahlung der Probanden können massiven Einfluss auf diese Erwartungshaltung haben. Auf eine angemessene Entlohnung ist daher großer Wert zu legen. Die Unsicherheit über seine Aufgabe muss dem Probanden durch eine klar umrissene Aufgabenstellung und eindeutige Instruktionen genommen werden.

5.2 Klassifizierung der Simulatoranwendung

Die Fahrsimulation wird in vielen Bereichen der Fahrzeugentwicklung erfolgreich eingesetzt. In diesem Schritt wird ein System zur Klassifizierung von fahrzeugtechnischen Anwendungen erstellt. Die Klassifizierung ermöglicht es, für die einzelnen Teilsysteme eines Simulators abzuschätzen, bis zu welchem Grad eine Abweichung von der Realität zulässig ist. Daraus kann ein Anforderungsprofil für den gesamten Simulator und seine Teilsysteme erstellt werden.

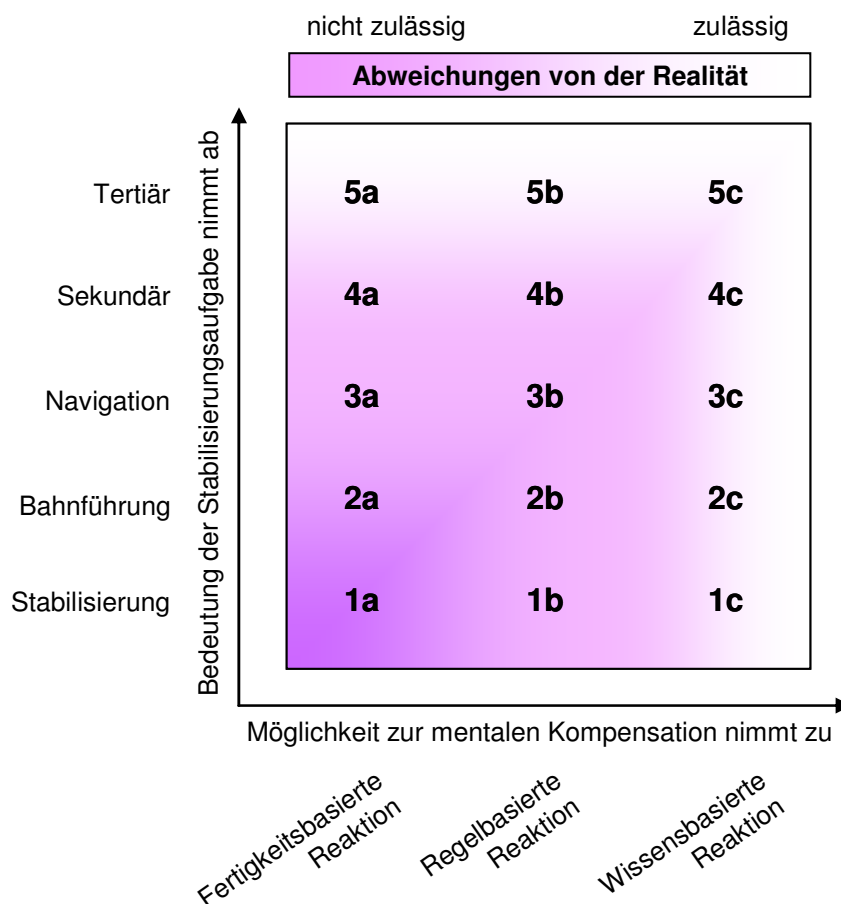


Abbildung 5-3: Schema zur Klassifizierung von Fahrsimulatoranwendungen

Die bislang erarbeiteten Erkenntnisse über die Eigenschaften des Reglers Mensch bei der Fahrzeugführung lassen eine Klassifizierung von Fahrsimulatoranwendungen mittels zweier

Hauptkriterien zu (Abbildung 5-3). Das erste Kriterium ist die Möglichkeit des Probanden, die Unzulänglichkeiten der Simulation mental so auszugleichen, dass seine Reaktion als ausreichend valide angesehen werden kann. Wie im Grundlagenkapitel 2.1.2 gezeigt, kann diese Einflussmöglichkeit an den bereits eingeführten Reiz-Reaktionsmechanismen festgemacht werden. Sie ist bei den sensomotorischen, fertigkeitbasierten Reaktionen sehr gering und wird bei regel- oder wissensbasierten Handlungen größer, da hier eine bewusste Einflussnahme des Fahrers auf seine Reaktionen möglich ist. Für die Simulatortechnik bedeutet dies, dass bei Untersuchungsschwerpunkten, welche auf regel- oder wissensbasierte Reaktionsmechanismen zugreifen, eine größere Abweichung vom realen Sinnesreiz zulässig sein kann. Der zulässige Grad der Abweichung hängt von der Anwendung ab und wird im nächsten Kapitel genauer beschrieben.

Die Art der Fahraufgabe ist ein zweites Kriterium zur Einstufung einer Anwendung. Wenn der Untersuchungsgegenstand die primäre Fahraufgabe auf der Stabilisierungsebene ist, muss diese in allen Aspekten unverfälscht nachgebildet werden. Dies gilt nicht mehr zwingend, wenn Bahnführungs- oder Navigationsaufgaben untersucht werden sollen, da die Reiz-Reaktionsmechanismen bei diesen Aufgaben meist nicht fertigkeitbasiert sind und somit eine bessere mentale Kompensation möglich ist, wenn Sinnesreize verfälscht dargestellt werden. Bei sekundären Aufgaben ist die Nachbildung der Stabilisierungsaufgabe noch erforderlich. Die Anforderungen an die Realitätsnähe sind aber weniger hoch, da sie nur Hinweisreize für die Ausübung der sekundären Aufgabe liefert. Werden tertiäre Aufgaben untersucht, ist theoretisch auch eine andere Regelaufgabe als die Fahrzeugfahrt zulässig. Es ergibt sich die in Abbildung 5-3 gezeigte Matrix mit 15 zu unterscheidenden Anwendungstypen. Die Nummerierung der Elemente der Matrix wird im Folgenden als Kennzeichnung für die entsprechende Klasse verwendet.

Es wird bei der folgenden Beschreibung vorausgesetzt, dass für Simulatorversuche im Bereich der Fahrzeugentwicklung in der Regel erfahrene Normalfahrer typisch sind. Aus dieser Randbedingung resultiert, dass einige der theoretisch möglichen 15 Klassen nicht besetzt sind. So gibt es beispielsweise für den normal erfahrenen Fahrer keine Handlungen auf der Stabilisierungsebene, welche wissensbasiert ablaufen. Ebenfalls untypisch sind fertigkeitbasierte Navigationsaufgaben. In Kapitel 5.3 wird daher nur für die sinnvoll besetzten Klassen ein Simulatorprofil erstellt.

Trotz dieser Klassifizierung ist es für den Entwickler unerlässlich, eine genaue Vorstellung davon zu haben, auf welche Parameter das Versuchsergebnis sensibel reagieren wird, um dies in den Details der Spezifikation zu berücksichtigen. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Anwendungen und des entsprechend vielfältigen Wissensspektrums ist es nicht sinnvoll, dieses fahrzeugtechnische Expertenwissen in die hier entwickelte Methode einzuarbeiten. Um dem Fahrzeugentwickler die Einordnung seiner Anwendung zu erleichtern, sind in den folgenden Kapiteln Beispiele für typische Anwendungen der o.g. Klassen beschrieben.

5.2.1 *Primär, Stabilisierung*

Klasse 1a: Stabilisierung, fertigkeitbasiert

Fertigkeitbasierte Stabilisierungsvorgänge umfassen Untersuchungen zur Längs- und Querdynamik eines Fahrzeugs. In diese Klasse ist das Lenkverhalten erfahrener Fahrer bei Normalfahrt, schneller Fahrt und auch bei extremen Fahrmanövern einzuordnen. Sie beinhaltet ebenfalls die Betätigung von Fahrpedal und Bremse bei Normalfahrt und besonders bei Manövern im Grenzbereich, wenn die Handlungen der Stabilisierung des Fahrzustands gelten. Ausdrücklich ausgeschlossen ist dagegen der antizipatorische Anteil der Längsregelung, also die Wahl der Grundgeschwindigkeit, welche der Bahnführungsebene zuzuordnen ist.

Sonderfall Vertikaldynamik

Einen Sonderfall innerhalb dieser Klasse bilden Untersuchungen zum Komfort und zur Noise and Vibration Harshness (NVH). Diese Beurteilung ist über die Kriterien Fahrgeschwindigkeit, Straßenverlauf und –zustand in starkem Maße von der primären Fahraufgabe abhängig, erfordert aber keine aktive Reaktion des Fahrers. Obwohl es sich um einen Vorgang auf Stabilisierungsebene handelt, können Abweichungen bei der Nachbildung der Stabilisierungsaufgabe zulässig sein, da nicht die Stabilisierungsreaktion des Fahrers Gegenstand der Untersuchung ist. Die Bedeutung für das Simulatorkonzept wird in Kapitel 5.3.1 erläutert.

Klasse 1b: Stabilisierung, regelbasiert

Darunter kann das Lenk-, Brems- und Beschleunigungsverhalten von Fahranfängern eingeordnet werden. Ebenso das Lenkverhalten erfahrener Fahrer unter wenig geläufigen Sicht- und Umweltverhältnissen wie z.B. dichter Nebel oder Glatteis. Für die normale Fahraufgabe ist eine regelbasierte Stabilisierung dagegen nicht typisch. Es wird daher kein Simulatorkonzept erstellt.

Klasse 1c: Stabilisierung, wissensbasiert

Ein Beispiel für diese Klasse wäre das Lenkverhalten von Fahranfängern bei wenig geläufigen Situationen, wie einem ausbrechenden Fahrzeugheck, wenn sie versuchen würden, theoretisch erlerntes Wissen bewusst zu aktivieren, um die richtige Lenkreaktion zu ermitteln. Diese Klasse ist nicht typisch für einen Normalfahrer. Es wird kein Simulatorkonzept erstellt.

5.2.2 *Primär, Bahnführung*

Klasse 2a: Bahnführung, fertigkeitbasiert

Dieser theoretisch gebildeten Klasse ist nur schwer ein realer Anwendungsfall zuzuordnen. Es ist für die Realität eher untypisch, dass der Vorgang der Planung von Kurs und Geschwindigkeit auf der automatisierten, fertigkeitbasierten Ebene abläuft. Ein Beispiel könnte die Geschwindigkeitswahl erfahrener Fahrer auf einer sehr vertrauten Fahrstrecke, wie z.B. dem täglichen Weg zur Arbeit, sein. Für diese Klasse wird kein Simulatorkonzept erstellt.

Klasse 2b: Bahnführung, regelbasiert

Untersuchungen zum antizipatorischen Brems- und Beschleunigungsverhalten sowie das Lenkverhalten im Sinne der Bahnführung sind dieser Klasse zuzuordnen. Die regelbasierte Bahnführung, also die Wahl von Geschwindigkeit und Kurs eines erfahrenen Fahrers in einer nicht vertrauten Verkehrssituation, ist ein typischer Inhalt von Untersuchungen zum Thema Verkehrstechnik. Es wird betrachtet, welche Mechanismen bei der Bahnführung wirksam sind und welche Auswirkungen Veränderungen der externen Hinweisreize des Verkehrs oder der Verkehrsinfrastruktur haben. Beispiele sind Maßnahmen zur Verkehrsberuhigung, zum Straßenverlauf oder auch zur Gestaltung von Tunnelleinfahrten unter dem Gesichtspunkt der Geschwindigkeitswahl.

Klasse 2c: Bahnführung, wissensbasiert

Ein Beispiel für diese Klasse ist die Geschwindigkeitswahl von Fahranfängern auf unvertrauter Strecke. Der Fall ist nicht typisch für einen Normalfahrer, es wird kein eigenes Simulator-konzept erstellt.

5.2.3 Primär, Navigation

Klasse 3a: Navigation, fertigkeitbasiert

Als Beispiel wird in der Literatur die Navigation bei der täglichen Fahrt zur Arbeit angeführt. Diese Art der Aufgabenstellung ist nicht typisch für die Fahrsimulation in der Fahrzeugentwicklung. Es wird kein eigenes Simulatorkonzept erstellt.

Klasse 3b: Navigation, regelbasiert

Die Navigation in einer vertrauten Umgebung ist ein Beispiel für diese Art der Fahraufgabe. Denkbar sind in diesem Zusammenhang verkehrstechnische Untersuchungen über die Mechanismen, welche der Mensch bei der Navigation anwendet. Ziel solcher Untersuchungen kann die Verbesserung von Beschilderungen, der Verkehrsführung oder die Erforschung neuartiger Verkehrsmodelle sein. Die Anwendung ist nicht typisch für die Fahrzeugentwicklung. Sie muss getrennt vom Bereich der fahrzeuginternen Navigationssysteme unterschieden werden, welche in die Klasse tertiärer Aufgaben einzuordnen sind.

Klasse 3c: Navigation, wissensbasiert

Die denkbaren Aufgabenstellungen und damit die Anforderungen an die Fahrsimulation sind denen der regelbasierten Navigation sehr ähnlich. Es wird daher auf das Simulatorkonzept 3b verwiesen.

5.2.4 Sekundäre Aufgaben

Gemeinsam ist allen drei Klassen, dass die primäre Fahraufgabe jetzt nur noch zur Erzeugung der Grundbelastung und der gewünschten Fahrsituation dient, aber nicht mehr selbst Untersuchungsgegenstand ist. Dies hat entsprechend geringere Anforderungen an die Nachbildung der Stabilisierungsaufgabe zur Folge.

Klasse 4a: Sekundäre Aufgaben, fertigkeitbasiert

Schalten und Kuppeln und ggf. die Betätigung von Blinker und Licht können als fertigkeitbasierte Handlungen erfahrener Normalfahrer eingestuft werden. Wenn diese Handlungen den Untersuchungsgegenstand darstellen, ist implizit, dass die Bedienelemente bekannt sind. Die Klasse ist kein typischer Untersuchungsgegenstand der Fahrzeugentwicklung, sondern im Bereich der Ergonomie einzuordnen. Es wird kein eigenes Simulatorkonzept erstellt. Die Anwendung und damit die Anforderungen an die Fahrsimulation sind ähnlich denen der Klasse 4b.

Klasse 4b: Sekundäre Aufgaben, regelbasiert

Typisch für regelbasierte sekundäre Aufgaben ist die Untersuchung bekannter sekundärer Funktionalitäten mittels einer neuen Mensch-Maschine-Schnittstelle. Im Gegensatz zu wissensbasierten, sekundären Aufgaben kennt der Proband bei regelbasierten Aufgaben bereits die Funktionalität. Er versucht sein Regelwerk anzuwenden und entsprechend mit der ihm unbekanntem Mensch-Maschine-Schnittstelle zu interagieren. Die Abgrenzung zu den wissensbasierten sekundären Aufgaben definiert sich über den jeweiligen Stand der Technik und den konkreten Wissensstand des Probanden hinsichtlich der zu testenden Funktion. Die Untersuchungen können sich mit neuartigen Bedienelementen, z.B. zur Getriebesteuerung ebenso befassen, wie mit bekannten, fahrdynamisch wirksamen FAS-Funktionen (z.B. Fahrgeschwindigkeitsregler, ACC), die über eine neue Mensch-Maschine-Schnittstelle zu bedienen sind.

Klasse 4c: Sekundäre Aufgaben, wissensbasiert

Bei der Einordnung in diese Kategorie muss als Charakteristikum gegeben sein, dass die zu prüfende Funktion nicht im Erfahrungsschatz des Fahrzeugführers verankert ist. Dies bedeutet, dass kein trainierter, regelbasierter Wirkzusammenhang zwischen den Vorgängen der Fahraufgabe und der neuen Funktion besteht. Typisch für die Klasse ist die Bedienung unbekannter sekundärer Funktionen, was vor allem im Bereich der Fahrerassistenzsysteme vorkommt. Der Fahrer wird mit neuen Funktionen der Fahrerassistenz konfrontiert (z.B. Stauassistent, Spurverlassenswarnung, Notbremssysteme), mit der er über eine ihm unbekanntem Mensch-Maschine-Schnittstelle interagiert.

5.2.5 Tertiäre Aufgaben

Klasse 5a: Tertiäre Aufgaben, fertigkeitbasiert

In diese Klasse kann die Bedienung von bekannten Standardsystemen, wie z.B. das Einschalten und die Lautstärkeregelung eines Radios, eingeordnet werden. Sie ist nicht typisch für die Fahrzeugentwicklung. Ein eigenes Simulatorkonzept wird daher nicht erstellt.

Klasse 5b: Tertiäre Aufgaben, regelbasiert

In diese Klasse fällt die Bedienung bekannter tertiärer Funktionen, wie z.B. die Bedienung von Heizung, oder die Senderwahl am Radiogerät. Ziel der Untersuchungen kann die Verbesserung von bereits bekannten Systemen und Mensch-Maschine Schnittstellen sein. Wie bei den

sekundären Aufgaben kann die Abgrenzung zu den wissensbasierten Handlungen nur über den jeweiligen Stand der Technik und den konkreten Wissensstand des Probanden getroffen werden.

Klasse 5c: Tertiäre Aufgaben, wissensbasiert

Die Klasse unterscheidet sich von der vorhergehenden dadurch, dass bei der Bedienung der tertiären Systeme ein unbekannter Aspekt hinzukommt. Dies kann bedeuten, dass neue Funktionalitäten über eine bekannte Mensch-Maschine-Schnittstelle bearbeitet werden, oder bekannte Funktionen über eine neuartige Mensch-Maschine-Schnittstelle bedient werden müssen (z.B. Navigationsgeräte, Bordcomputer, Telefone). Die Anwendung und damit die Anforderungen an die Fahrsimulation sind sehr ähnlich zu denen der Klasse 5b. Es wird daher kein eigenes Simulatorkonzept erstellt.

5.3 Ableitung typischer Ausführungen von Fahr simulatoren

Für die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen sechs typischen Anwendungsfälle werden jetzt zugehörige Simulatorkonzepte beschrieben. Jedes dieser Gesamtkonzepte wird durch die tabellarische Zusammenstellung je einer typischen Ausbaustufe jedes Subsystems repräsentiert, wie in Kapitel 3.2 hergeleitet. Die Bezeichnung der Anforderungen mittels einer Buchstaben-Ziffern-Kombination wird ebenfalls aus Kapitel 3.2 übernommen. Anforderungen in Klammern sind nützlich, aber nicht zwingend erforderlich. Wenn Ausführungen durch Schrägstriche getrennt sind, so sind diese Ausführungen gleichwertig für die Anwendung geeignet.

Wenn verschiedene Anwendungen für einen Simulator geplant sind, sind die entsprechenden Anforderungsprofile zu überlagern. Dies trifft für die meisten existierenden Fahr simulatoren zu, sodass die im Folgenden beschriebenen sechs Ausbaustufen in der Realität meist abgewandelt oder ergänzt zu finden sind.

Um die unterschiedlichen Anforderungsprofile eindrücklicher darzustellen, sind Spinnennetzdiagramme beige stellt. In den Diagrammen ist das jeweilige Anforderungsprofil der derzeit aufwändigsten Ausführung gegenübergestellt. Die Anforderungsbereiche Sicht, Bewegung etc. sind farblich gruppiert. Merkmale mit nur einer Ausprägung wie z.B. Stereosehen und Minimalanforderungen wie die Reaktionszeit der Projektoren werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in die Graphik aufgenommen und müssen der Tabelle entnommen werden. Wenn mehrere Ausprägungen für ein Merkmal angegeben sind, wird der höchste Wert im Diagramm dargestellt.

5.3.1 Fertigkeitsbasierte Stabilisierung

Die Anwendung stellt die höchsten Anforderungen an die Qualität der Stabilisierungsaufgabe und damit an die Bewegungssimulation, also den am schwersten realitätsnah nachzubildenden Sinnesreiz. Die Verfälschungen der entsprechenden Sinnesreize ist nicht oder nur in geringem Maß zulässig, wenn eine realitätsnahe Reaktion erwünscht ist.

Sichts simulation

Die unverfälschte Wahrnehmung der Eigengeschwindigkeit und der momentanen Position auf der Fahrspur bestimmen die Anforderungen an das Sichtsystem.

- Der Augabstand ist für den optischen Fluss sekundär und kann ggf. zu Gunsten einer dynamischeren Bewegungssimulation zurückstehen.
- Für eine gute Geschwindigkeitswahrnehmung ist ein horizontaler Bildbereich von 120-140° ausreichend. Da das Präsenzepfinden aber auch für die Stabilisierung eine Rolle spielt, ist eine Vollsicht anzustreben.
- Die Unterbrechungsfreiheit der Frontsicht ist ein wesentliches Merkmal für den optischen Fluss. Eine unterbrechungsfreie Sicht mit Edge-Blending ist daher erforderlich.
- Die Ansichten der Außenspiegel sind hilfreich zur Wahrnehmung der Ist-Position und daher unbedingt darzustellen. In den Spiegelansichten muss ein Teil des Ego-Fahrzeugs sichtbar sein. Bewegungsparallaxe ist hilfreich, wenn die Unzulänglichkeiten der Spiegellösung vermieden werden können.
- Die Bildqualität ist entscheidend für die Ausbildung des optischen Flusses. Es sind entsprechend die höchsten Anforderungen an Bildberechnungsrate, Helligkeit und Kontrast zu stellen. Wenn die Lesbarkeit von Schildern nicht erforderlich ist, ist eine Auflösung von 2-3 Bogenminuten/Pixel ausreichend. Der Projektor muss ohne Verwischungseffekte arbeiten (Reaktionszeit <8ms), um eine präzise Stabilisierung zu gewährleisten und Irritationen zu vermeiden.
- Head-Tracking und Stereosehen erbringen gemäß der Theorie Vorteile in der Wahrnehmung der Ist-Position. Es ist bei der Realisierung darauf zu achten, dass keine Nachteile für das Präsenzepfinden durch unbequeme oder ungewohnte technische Vorrichtungen (Tracking-Komponenten) entstehen.

Bewegungssimulation

Die haptischen Sinne und der Gleichgewichtssinn sind durch Bewegungssystem und primäre Bedienelemente unverfälscht zu bedienen. Da Pedalkräften und Lenkmomenten bei der Stabilisierungsaufgabe unmittelbar den Untersuchungsgegenstand darstellen, ist eine von der Realität abweichende Anpassung dieser Größen unzulässig, auch wenn dadurch das Fahrerverhalten näher an die Realität herangeführt werden kann.

- Ein Standard-Bewegungssystem in Kombination mit zwei großen translatorischen Verfahrenswegen und einem rotatorischen Freiheitsgrad kann einen Teil des bei Normalfahrt auftretenden Beschleunigungsspektrums darstellen. Die bei den zu untersuchenden Manövern auftretenden Beschleunigungen sind mit denen der Realfahrt abzugleichen. Eine Abweichung ist generell zunächst nicht zulässig und muss für den Einzelfall evaluiert werden. Für Manöver mit eingeschränkter Längs- oder Querdynamik, wie Spurwechsel und Geradeausfahrt, kann die Verwendung nur eines translatorischen Verfahrensweges er-

wogen werden. Dabei sind die in Kapitel 3.2.6 beschriebenen Effekte zu berücksichtigen. Die stark ungleichmäßige Verstärkung einzelner Kanäle ist zu vermeiden.

- Geschwindigkeitsabhängige, niederfrequente Vibrationen sind förderlich für die Geschwindigkeitswahrnehmung, weshalb zusätzlich ein Freiheitsgrad für hochfrequente Anteile der Vertikaldynamik zu realisieren ist. Im Fall von Fahrdynamikuntersuchungen ist die spektrale Leistungsdichte der Anregungen mit der Realfahrt abzugleichen.
- Fahrdynamik- und Reifenmodell bilden die Basis für die richtige Bewegungs- und Sichtsimulation. Sie sind als MKS- bzw. FE-Modelle auszuführen und mit der Kinematik des Realfahrzeugs abzugleichen.

Geräuschsimulation

Es sind die für das Geschwindigkeitsempfinden und die Wahrnehmung des Fahrzustandes förderlichen Geräusche von Fahrbahn, Aerodynamik und Motor vom Realfahrzeug zu übernehmen. Eine quantitative Anpassung an das subjektive Empfinden des Fahrers scheint hier zulässig, da die Informationen nicht direkt in den Regelkreis der Stabilisierung einfließen, sondern nur eine unterstützende Rolle spielen. Geschwindigkeitsabhängige, hochfrequente Vibrationen sind hilfreich und daher zu implementieren. Nebengeräusche und Geräusche des autonomen Verkehrs sind für diese Anwendung sekundär. Falls eine Verkehrssimulation gegeben ist, sind deren Geräusche entfernungs- und geschwindigkeitsabhängig und idealerweise mit Doppler-Effekt darzustellen.

Die korrekte Lokalisation der Geräusche ist ein Faktor, welcher vor allem das Präsenzepfinden verbessert und daher auch hilfreich für die Kurs- und Geschwindigkeitsregelung ist. Als typisch für den Beitrag der Geräuschsimulation zur Stabilisierung kann jedoch der reine, geschwindigkeitsrelevante Informationsgehalt gelten. Die Ausführung mit zwei Lautsprechern, die diesen Geräuschinhalt unverfälscht darstellen, wird deshalb empfohlen.

Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Unter funktionalen Gesichtspunkten ist ein Fahrstand mit den primären Bedienelementen ausreichend. Optik und Haptik der primären Mensch-Maschine-Schnittstelle des Serienfahrzeugs sind aber förderlich für den Regelvorgang, was zumindest ein Teilfahrzeug bedingt. Die Wahrnehmung der Ist-Position auf der Fahrspur erfolgt zum Teil an Referenzpunkten der Karosserie, weshalb während der Fahrt keine Modifikationen an der Karosserie des Serienfahrzeugs sichtbar sein sollten. Für die Anwendung ist also die Verwendung eines Vollfahrzeugs mit serienmäßiger Mensch-Maschine-Schnittstelle zu empfehlen.

Die Kraft-Weg-Kennlinien der Pedale sind mit dem Realfahrzeug abzugleichen. Abweichungen sind nicht zulässig. Gleiches gilt für die Modellierung des Lenkmoments und ggf. aktiver Lenksysteme, was ein 3D-Reifenmodell, die Modellierung der Lenkinematik und der Lenkmomentenunterstützung erforderlich macht.

Datenbasis und Verkehrssimulation

Für die Geschwindigkeitswahrnehmung ist auf eine der Realität entsprechende, merkmalsreiche Ausgestaltung der unmittelbaren Umgebung der Fahrbahn zu achten, wohingegen weiter entfernte Objekte für die Stabilisierung nicht typischerweise erforderlich sind. Dabei ist vor allem Wert auf die realitätsnahe Texturierung und die korrekte Skalierung der Objekte der Datenbasis zu legen. Ob die Datenbasis statisch, statisch-modular oder dynamisch ausgeführt ist, ist weniger wichtig. Autonomen Verkehr ist für die Anwendung nicht erforderlich.

Gesamtkonzept

Typisch für die Simulatorkonfiguration ist die Priorisierung der Bewegungssimulation vor der Sichtssimulation. Ein Standard-Bewegungssystem mit großen Verfahrenswegen und zwei zusätzlichen translatorischen Verfahrenswegen ist auch für die Abdeckung der Normalfahrt unumgänglich, wohingegen Einschränkungen hinsichtlich des Augabstands zu Gunsten der Dynamik des Bewegungssystems zulässig erscheinen. Für die Anwendung ist daher ein Flying-Screen Konzept mit geringem Augabstand, Vollfahrzeug und realitätsgetreuer Mensch-Maschine-Schnittstelle typisch (Tabelle 5-1, Abbildung 5-4).

Fertigkeitsbasierte Stabilisierung				
Sichtsimulation (rot)				
Augabstand: A1	Sichtbereich: B2	Stereosehen: --	Headtracking: --	Rückspiegel: E2
Kontinuität: F3	Auflösung: G2	Bildberechnung: H1	Projektoren: J2	
Bewegungssimulation (schwarz)				
BWS < 6 DOF: K1	Standard BWS: --	BWS > 6 DOF: M1/M2/M3	Fahrdynamik: N3	Reifen: O4
Geräuschsimulation (blau)				
Primäre Geräusche: P1 (P2)		Sekundäre und tertiäre Geräusche: Q1 (Q2)		Konzept: R1, R3
Fahrstand, MMS (magenta)				
Fahrzeug: S3	MMS: T2	Lenkung: U3	Fahr-, Bremspedal: V2	
Datenbasis, AV (grün)				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y1	Verkehr: (Z1)	Einzelfahrzeuge: --	

Tabelle 5-1: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für fertigkeitsbasierte Stabilisierungsaufgaben

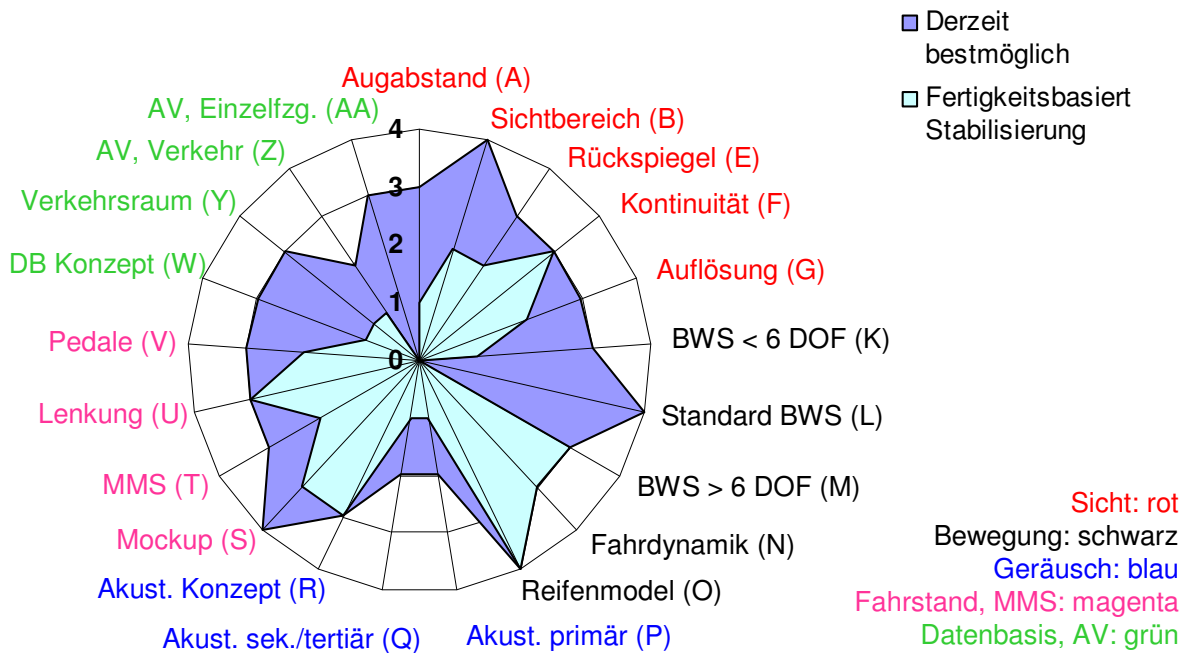


Abbildung 5-4: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für fertigkeitsbasierte Stabilisierungsaufgaben

Sonderfall Vertikaldynamik

Eine Sonderposition nehmen Untersuchungen zur Vertikaldynamik ein. Die Anforderungen an die Geschwindigkeitswahrnehmung sind dabei ebenso wichtig wie bei Fahrdynamikuntersuchungen, da das Komfortempfinden von der Erwartungshaltung des Fahrers hinsichtlich der vertikaldynamischen Fahrzeugreaktionen und damit auch von der Fahrgeschwindigkeit abhängt. Bei einer schneller durchfahrenen Strecke rechnet der Fahrer mit verstärkten Stößen und höherfrequenten fahrbahninduzierten Schwingungen als bei langsamer Fahrt. Da Komfortuntersuchungen in der Regel getrennt von quer- und längsdynamischen Manövern stattfinden, können skalierte Bahnbeschleunigungen zulässig sein.

Die vertikaldynamischen Schwingungen werden mit verschiedenen Hautsinnen, dem Vestibularorgan und auf akustischem Wege wahrgenommen. Aufgrund der hohen Bandbreite und der sensiblen Wahrnehmung ist das Spektrum der Schwingungen vollständig und unverfälscht darzustellen. Wenn dies nicht gewährleistet ist, erscheint auf Grund der komplexen Signalaufnahme und -verarbeitung eine Komfortbeurteilung wenig zielführend. Die Anforderungen an das Übertragungsverhalten des Bewegungssystems ergeben sich direkt aus Messungen am Realfahrzeug oder validierten Simulationen der Vertikaldynamik. Wenn die Untersuchung im geschlossenen Regelkreis stattfinden soll, ist das Fahrdynamikmodell unmittelbar mit dem Realfahrzeug abzugleichen. Dies erfordert die Verwendung eines 3D-Reifenmodells, die Darstellung der Feder-Dämpfereigenschaften und die Modellierung der Achs- und Aufbaukinematik mittels eines MKS-Fahrzeugmodells.

Da die Erwartungshaltung des Fahrers von der Beschaffenheit der Fahrstrecke abhängt, muss diese möglichst detailgetreu texturiert und dargestellt werden. Eine Auflösung von 2-3 Bogenminuten/Pixel ist zu realisieren. Falls die Anwendung die Fahrt auf Schlechtwegstrecken vorsieht, müssen explizit sichtbare Fahrbahnebenheiten wie Schlaglöcher, Fahrbahnabsätze, Spurrinnen etc. modelliert sein. Die Darstellung dieser Unebenheiten durch das Bewegungssystem muss verzögerungsfrei und bildsynchron erfolgen. [56]

5.3.2 *Regelbasierte Bahnführung*

Bei dieser verkehrstechnischen Anwendung ist vorrangig auf die Qualität und Flexibilität der Datenbasis und der Verkehrssimulation zu achten. Im Gegensatz zur Stabilisierung werden daher die höchsten Anforderungen nicht an die Bewegungssimulation sondern an die Sichtsimation gestellt. Da das für den Fahrvorgang abgelegte Regelwerk des Fahrers aktiviert werden soll, ist aber auch die primäre Fahraufgabe in ausreichender Qualität nachzubilden.

Sichtsimation

Das Sichtsystem soll bei dieser Anwendung ein gutes Präsenzepfinden erzeugen, alle für die Verkehrstechnik relevanten Fahrsituationen darstellen können und die ausreichende Einschätzung der eigenen Geschwindigkeit ermöglichen. Es können folgende Anforderungen abgeleitet werden:

- Ein großer Augabstand ist für genannten Aufgaben der Sichtsimation nicht typischerweise erforderlich.
- Das geforderte, gute Präsenzepfinden und die Darstellung von Abbiegevorgängen etc. erfordert zwingend eine Vollsicht. Je nach Anwendung kann auch eine Rundumsicht sinnvoll sein. Dieser Sichtbereich deckt dann auch die Anforderung aus der Geschwindigkeitswahrnehmung.
- Da es sich um eine antizipatorische Anwendung handelt, ergeben sich keine speziellen Anforderungen hinsichtlich der Abstandseinschätzung im Nahbereich. Stereosehen ist daher nicht erforderlich.
- Head-Tracking liefert Information über Entfernungen im nahen und mittleren Entfernungsbereich und kann daher für die Bildung der Sollgeschwindigkeit nützlich sein.
- Für die Rückspiegelansichten ist weder Bewegungsparallaxe noch die direkte Positionsdarstellung, sondern nur die deutliche Darstellung der Inhalte der rückwärtigen Verkehrssituation ausschlaggebend. Es kann daher ein LC-Display oder ein virtueller Rückspiegel gewählt werden.
- Die Unterbrechungsfreiheit der Frontsicht ist für die lückenlose Darstellung von Verkehrssituationen und das Präsenzepfinden erforderlich. Da der optische Fluss zwar förderlich, aber nicht primär wichtig ist, kann eine durchgängige Frontprojektion ohne Edge-Blending gewählt werden.

- Die Anwendung stellt keine erhöhten Anforderungen an Bildberechnungsrate, Helligkeit und Kontrast. Erhöhte Anforderungen an Bildberechnung und die Reaktionszeit des Projektors ergeben sich, wenn ein höherer Geschwindigkeitsbereich untersucht werden soll. Wenn die Lesbarkeit von Schildern erforderlich ist, ist eine Auflösung von einer Bogenminute anzustreben. Da auch die Abstandseinschätzung im mittleren Entfernungsbereich von einer erhöhten Auflösung profitiert, ist diese als zentrale Anforderung an das Sichtsystem zu sehen.

Bewegungssimulation

Der antizipatorische Aspekt der Fahraufgabe beruht auf Informationen aus dem Sichtsystem. Bewegungsinformationen sind nur unter dem Gesichtspunkt relevant, die durch die Stabilisierungsaufgabe verursachte Belastung realitätsnah zu gestalten.

- Das Bewegungssystem sollte mindestens die Darstellung der Aufbaubewegungen ermöglichen und daher drei Freiheitsgrade besitzen. Der Bewegungsumfang ist von der Anwendung der Neigungssimulation und damit von der Ausführung des Sichtsystems abhängig. Die Verwendung eines Standard-Bewegungssystems ermöglicht in geringem Umfang die Darstellung von Bahnbewegungsinformationen und nähert daher die Belastung durch die primäre Fahraufgabe an die Realität an. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Ausführung des Bewegungssystems als Standard-Bewegungssystem mit geringen Verfahrenswegen zu empfehlen.
- Geschwindigkeitsabhängige, niederfrequente Vibrationen sind förderlich für die Geschwindigkeitswahrnehmung und daher zu implementieren.
- Da die Bahnführung Gegenstand der Untersuchung ist, sollten die durch das Fahrdynamik- und Reifenmodell verursachten Abweichungen nicht merklich sein. Ein nicht konfigurierbares Zweispurmodell ist aber ausreichend, weil die Aufgabe keine fahrdynamischen Aspekte umfasst.
- Es ist für die Normalfahrt nicht erforderlich, ein Reifenmodell mit kombinierter Längs- und Querdynamik zu verwenden.

Geräuschsimulation

Weder der Untersuchungsgegenstand selbst, noch die Güte der primären Fahraufgabe stellen erhöhte Ansprüche an die Geräuschsimulation. Die Darstellung der primären Fahrgeräusche über ein Zweikanal-System kann daher als ausreichend empfohlen werden.

Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Da ein gutes Präsenzepfinden erzeugt werden soll, ist mindestens ein Teilfahrzeug mit den allen für die Anwendung erforderlichen primären und sekundären Bedienelementen zur Interaktion mit der Verkehrsumgebung empfehlenswert. Die Kraft-Weg Kennlinien der Pedale und das Lenkmoment sind nicht Gegenstand der Untersuchung. Sie können an die Erfordernisse der Anwendung angepasst werden und von der Realität abweichen.

Datenbasis und Verkehrssimulation

Bei der Datenbasis ist vor allem Wert auf die realitätsnahe, merkmalsreiche Ausgestaltung der erweiterten Fahrumgebung zu legen. Da der Verkehrsraum im Zentrum der Anwendung steht, ist eine Datenbasis mit flexibel veränderbaren Inhalten wie Beschilderung und sonstiger Verkehrstechnik erforderlich. Zur flexiblen Erzeugung bestimmter Verkehrsräume, wie z.B. Kreuzungskombinationen, kann ein modularer Aufbau hilfreich sein. Die Ausführung als dynamische Datenbasis ist nicht typisch. Auch die Flexibilität der Verkehrssimulation ist hoch zu priorisieren. Die entsprechenden Anforderungen können direkt aus der Anwendung abgeleitet werden.

Gesamtkonzept

Typisch für diese Simulorkonfiguration ist die Priorisierung von Datenbasis und Sichtsimulation vor der Bewegungssimulation. Ein 3DOF-Bewegungssystem mit kleinen Verfahrwegen ist im Rahmen der Untersuchungen bei Normalfahrt für die Nachbildung der Aufbaubewegungen ausreichend. Da ein großer Augabstand nicht zwingend erforderlich ist, kann ein Flying-Screen Simulator mit Teil- oder Vollfahrzeug auf einem Bewegungssystem als typisch gelten. Der Simulator zeichnet sich durch eine verkehrstechnisch flexible und ggf. modulare Datenbasis aus (Tabelle 5-2, Abbildung 5-5).

Regelbasierte Bahnführung				
Sichtsimulation (rot)				
Augabstand: A1	Sichtbereich: B3	Stereosehen: --	Headtracking: D1	Rückspiegel: E3
Kontinuität: F2	Auflösung: G3	Bildberechnung: H1	Projektoren: J1	
Bewegungssimulation (schwarz)				
BWS < 6 DOF: K1, K2/K3	Standard BWS: L1/L3	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N2	Reifen: O1
Geräuschsimulation (blau)				
Primäre Geräusche: P1		Sekundäre und tertiäre Geräusche: --		Konzept: R1
Fahrstand, MMS (magenta)				
Fahrzeug: S2	MMS: T2	Lenkung: U1	Fahr-, Bremspedal: V1	
Datenbasis, AV (grün)				
DB, Konzept: W2	Verkehrsraum: Y3	Verkehr: Z2	Einzelfahrzeuge: AA1, AA2, AA3	

Tabelle 5-2: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regelbasierte Bahnführungsaufgaben

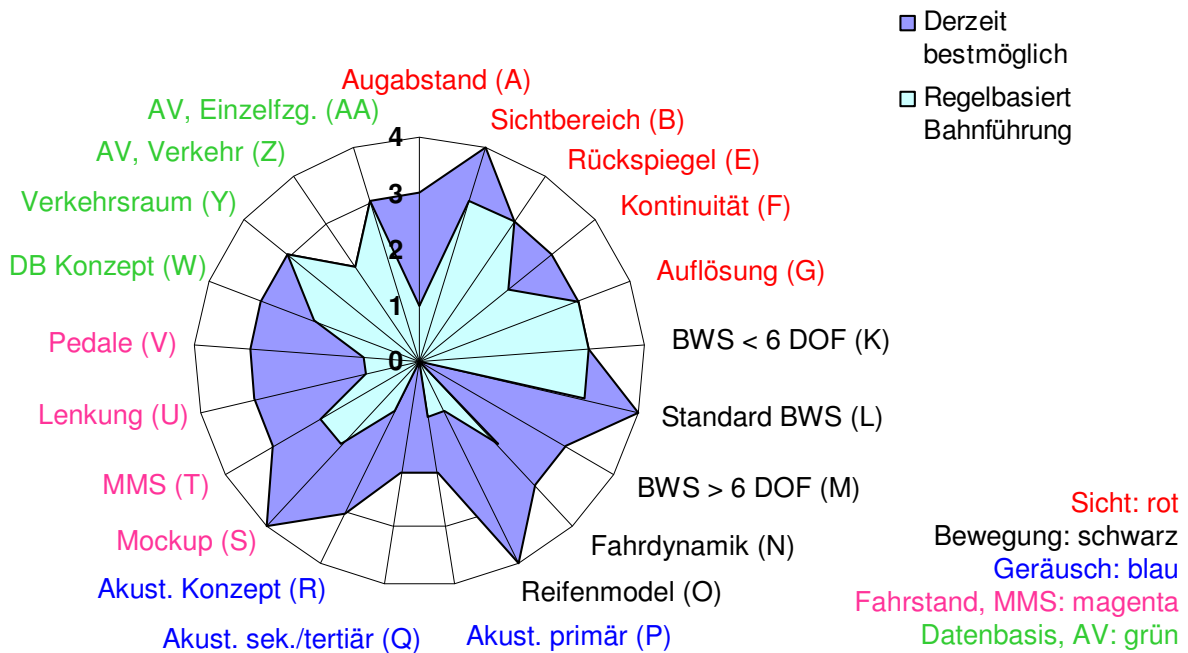


Abbildung 5-5: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regelbasierte Bahnführungsaufgaben

5.3.3 Regel- und wissensbasierte Navigation

Ein Fahrsimulator kann im Zusammenhang mit der Navigation reproduzierbare Bedingungen für Grundlagenuntersuchungen über die bei der Orientierung des Menschen in einer nicht vertrauten Umgebung wirksamen Mechanismen schaffen. Bei den Untersuchungen kann es um funktionale Entwicklung von verkehrstechnischen Hilfssystemen zur Navigation (z.B. Beschilderungen) gehen. Für die Konzipierung des Simulators muss diese Anwendung von Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle, z.B. von Navigationssystemen, unterschieden werden.

Sichtsimulation

Da weder Bahnführungs- noch Stabilisierungsaspekte untersucht werden, sind die Anforderungen an die Sichtsimulation nicht sehr hoch. Sie dient nur zur Darstellung der für die Navigationsaufgabe erforderlichen Bildinhalte. Lediglich die Auflösung muss hoch genug sein, um eine der Realität entsprechende Lesbarkeit von Schildern zu gewährleisten. Da die Navigation während der Fahrt untersucht werden soll, ist ein erster Geschwindigkeitseindruck erforderlich, wofür in diesem Zusammenhang aber ein horizontaler Bildausschnitt von 40-60° ausreichend ist. Rückspiegelansichten sind nicht erforderlich.

Bewegungssimulation

Für diesen Untersuchungsgegenstand ist keine Bewegungssimulation erforderlich. Die Darstellung geschwindigkeitsabhängiger Vibrationen verbessert den Eindruck, eine Aufgabe in einer dynamischen Fahrsituation zu erfüllen.

Geräuschsimulation

Eine einfache Geräuschsimulation mit einer zweikanaligen Wiedergabe der primären Fahrgeräusche kann zur Verbesserung des Präsenzepfindens genutzt werden, um dem Fahrer den Transfer der geleisteten Aufgabe auf die Realfahrtsituation zu erleichtern.

Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Als Fahrzeug-Mockup ist ein Fahrstand mit primärer Mensch-Maschine-Schnittstelle und den für die Aufgabe erforderlichen Bedienelementen ausreichend. Weder die Einhaltung der Spur, noch ein starkes Präsenzepfinden sind für den wissensbasierten Untersuchungsgegenstand zwingend erforderlich.

Datenbasis und Verkehrssimulation

Hinsichtlich Texturierung und Inhalten stellt diese Kategorie keine besonderen Anforderungen. Die erforderlichen Merkmale der Datenbasis (Schilder, Straßenbeschriftungen, etc.) ergeben sich direkt aus der Anwendung. Eine Verkehrssimulation ist für eine der Realfahrt vergleichbare Belastung und für die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern zu implementieren.

Gesamtkonzept

Ein statischer Fahrstand mit einfacher Sicht- und Geräuschsimulation ist für diese Aufgabe typischerweise ausreichend (Tabelle 5-3, Abbildung 5-6). Der Erkenntnisgewinn wird hier in der Regel durch Befragung und Beobachtung des Fahrers während der Fahrt erzielt, was die Abstraktion und bewusste Übertragung der erlebten Situation durch den Fahrer ermöglicht. Eine Zusatzanforderung kann spezielle Messtechnik sein, wie z.B. eine Vorrichtung zur Blickerfassung.

Fertigkeitsbasierte Stabilisierung				
Sichtssimulation (rot)				
Augabstand: A1	Sichtbereich: B1	Stereosehen: --	Headtracking: --	Rückspiegel: --
Kontinuität: F1	Auflösung: G3	Bildberechnung: --	Projektoren: --	
Bewegungssimulation (schwarz)				
BWS < 6 DOF: K1	Standard BWS: --	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N1	Reifen: O1
Geräuschsimulation (blau)				
Primäre Geräusche: P1		Sekundäre und tertiäre Geräusche: --		Konzept: R1
Fahrstand, MMS (magenta)				
Fahrzeug: S1	MMS: T1	Lenkung: U1	Fahr-, Bremspedal: V1	
Datenbasis, AV (grün)				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y1	Verkehr: Z1, Z2	Einzelfahrzeuge: AA1	

Tabelle 5-3: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regel- und wissensbasierte Navigationsaufgaben

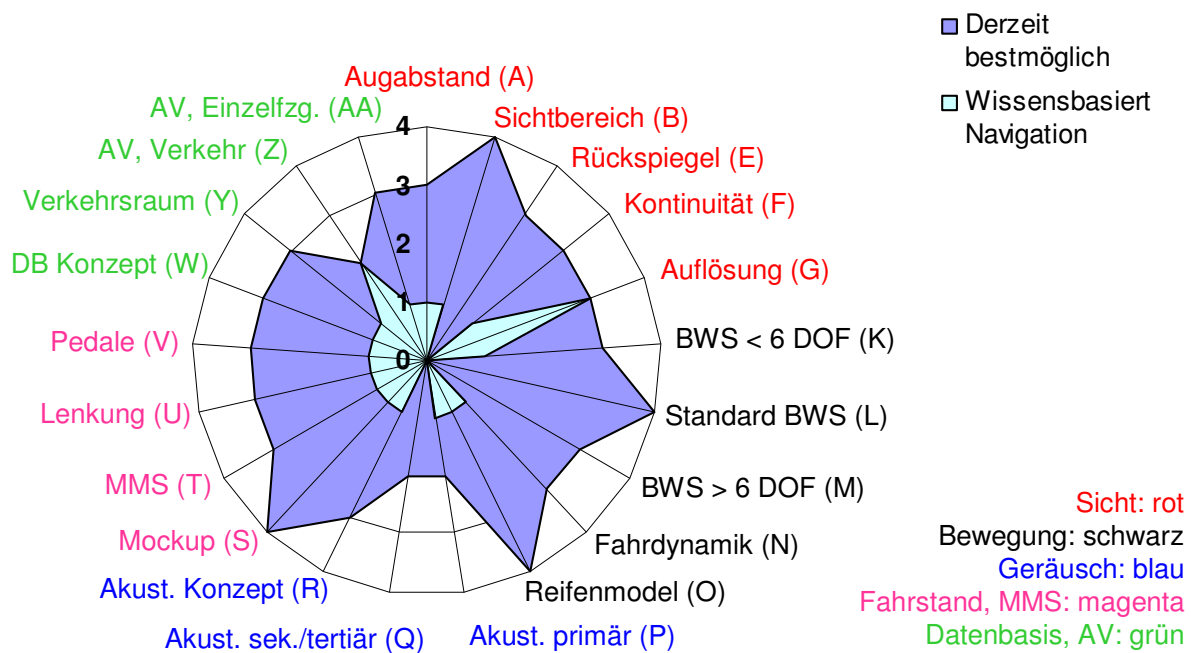


Abbildung 5-6: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regel- und wissensbasierte Navigationsaufgaben

5.3.4 Regelbasierte sekundäre Aufgaben

Die primäre Fahraufgabe dient hier vor allem dazu, den erforderlichen Kontext an Verkehrssituationen durch die Gestaltung der Datenbasis und der Verkehrssimulation zu schaffen. Voraussetzung dafür ist die intensive Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe, also das Präsenzepfinden. Wie bereits gezeigt, wird das Präsenzepfinden von allen Sinneseindrücken und auch von der persönlichen Einstellung des Probanden geprägt. Die Bewegungssimulation ist dabei nur eine von vielen Einflussgrößen. Kennzeichnend für regelbasierte, sekundäre Aufgaben ist allerdings, dass der Fahrer die untersuchten Funktionen bereits kennt und daher auch mit den Auswirkungen auf den Fahrvorgang vertraut ist. Die zulässigen Abweichungen von der Realität sollten somit so gering wie möglich sein und hängen stark vom konkreten Versuch ab.

Sichtsimulation

Für das Präsenzepfinden und die uneingeschränkte Darstellung von Verkehrssituationen ist eine unterbrechungsfreie Vollsicht mit Edge-Blending zwingend erforderlich. Eine Rundumsicht verbessert nicht zwingend das Präsenzepfinden, kann aber aus funktionalen Gründen sinnvoll sein. Kennzeichnend für die Anwendung ist der ständige Wechsel des Fahrerblicks zwischen der Mensch-Maschine-Schnittstelle und der Verkehrssimulation. Ein Augabstand von mehr als 2,5m ist daher für den Akkommodationseffekt erforderlich. Da für den Test von Fahrerassistenzsystemen (FAS) auch Abbiegesituationen und querdynamische Manöver erforderlich sein können,

sollten Projektoren mit geringer Reaktionszeit verwendet werden, um den Verwischungseffekt bei schnell bewegten Bildinhalten zu vermeiden.

Stereosehen und Head-Tracking können eine Verbesserung der Abstandswahrnehmung im Nahbereich bewirken. Wenn das FAS, wie z.B. bei Spurführungsassistenten, die Stabilisierungsaufgabe betrifft, kann die Implementierung der beiden Komponenten sinnvoll sein. Die Rückspiegelansichten sollten so ausgelegt sein, dass eine Verbesserung der Spurhaltung erzielt wird.

Um die Sichtsimulation für die primäre Fahraufgabe zu optimieren, ist eine Auflösung von mindestens 2-3 Bogenminuten/Pixel vorzusehen. Eine weitere Verbesserung ist hilfreich, aber nur dann zwingend, wenn für die Anwendung die Lesbarkeit von Schildern erforderlich ist.

Bewegungssimulation

Wenn sekundäre, fahrdynamisch nicht wirksame Systeme betrachtet werden, ergeben sich nur geringe Anforderungen an die Bewegungssimulation. Soll dagegen die fahrdynamische Regelfunktion von FAS entwickelt werden, kann eine verbesserte Bewegungssimulation auch die Validität der Versuchsergebnisse stark verbessern.

Die typischen Anwendungen aus dieser Kategorie sind aber Grundlagen-, Akzeptanz- und Mensch-Maschine-Schnittstelle-Untersuchungen von FAS. Die Bewegungssimulation dient vorrangig zur Senkung der Varianz im Regelverhalten. Zusätzlich hat das Bewegungssystem bei diesen Anwendungen die Aufgabe, den Fahrer über den Regeleingriff des aktiven FAS durch vestibuläre Hinweisreize zu informieren. Greift z.B. der Abstandstempomat eines LKW auf die Dauerbremsen zu, so wird dies vom Fahrer gut erkannt und akzeptiert, wenn sich ein Bremsnick einstellt und ein entsprechendes Geräusch abgespielt wird. Dabei ist weniger die absolute Höhe, sondern das Vorhandensein der vestibulären Information Ausschlag gebend.

Für die Bewegungssimulation ergibt sich die Anforderung nach drei Freiheitsgraden für die Darstellung der Aufbaubewegungen und ggf. kurze, translatorische Bewegungen in x- und y-Richtung als Hinweisreize für die Reaktion der Regelsysteme. Dafür bietet sich ein Standard-Bewegungssystem an. Um Aufbaubewegungen und Hinweisreize darzustellen sind Verfahrswege zwischen 0,5 und 1m (x/y) ausreichend.

Da dem Fahrer die Funktionen des FAS und deren Auswirkung auf die Fahrdynamik bekannt sind und ein regelbasiertes Verhalten betrachtet werden soll, bei dem die Möglichkeit zur Abstraktion und zum bewussten Ausgleich der verfälschten Bewegungseindrücke begrenzt sind, profitiert die Anwendung sicherlich von einem Standard-Bewegungssystem mit großen Verfahrswegen ($> \pm 1,5\text{m}$ in x-/y-Richtung). Die Implementierung geschwindigkeitsabhängiger Vibrationen ist für diese Anwendung erforderlich.

Da die Anwendung die realitätsnahe Darstellung der Aufbaubewegungen erfordert, sollten Zweispurmodelle und Reifenmodelle mit kombinierter Quer- und Längsdynamik verwendet werden. Fahrdynamik- und Reifenmodell müssen nicht als MKS- bzw. FE-Modelle ausgeführt sein.

Geräuschsimulation

Die Geräuschsimulation sollte nicht nur Informationen über den Fahrzustand beinhalten, sondern auch möglichst detailliert die für das Fahrzeug charakteristischen Nebengeräusche darstellen. Ebenso ist die Lokalisation der Geräusche und die Implementierung eines Körperschallwandlers für geschwindigkeitsabhängige Vibrationen hilfreich. Auf die Darstellung der Geräusche der Verkehrssimulation inklusive des Doppler-Effektes ist besonderer Wert zu legen, da die Anwendung meist die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern erfordert.

Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Typisch für diese Anwendung ist die Verwendung eines Serienfahrzeugs oder eines Vollfahrzeugs mit vollständiger Mensch-Maschine-Schnittstelle. Für den Test einer Mensch-Maschine-Schnittstelle ist eine konfigurierbare Anzeige für die schnelle Umsetzung von Varianten hilfreich. Die Bedienkräfte der primären Mensch-Maschine-Schnittstelle sollten sich an der Realität orientieren, wobei Anpassungen zulässig sind, um die Regelung für den Fahrer zu vereinfachen. So können beispielsweise die Pedalkräfte erhöht werden, um zu starkes Bremsen oder Beschleunigen zu vermeiden. Dies ist zulässig, wenn die primären Reaktionen nicht Gegenstand einer quantitativen Auswertung sind. Die Nachbildung der Pedalkräfte kann passiv erfolgen, solange die Anwendung kein aktives Bedienelement erfordert.

Datenbasis und Verkehrssimulation

Die Datenbasis muss im Nah- und Fernbereich der Fahrbahn realitätsnah modelliert und texturiert sein. Für die sekundäre Aufgabe soll sie durch die Darstellung einer merkmalsreichen Fahrumgebung vor allem das Präsenzepfinden verbessern. Daneben sind die Anforderungen für eine gute Abstandswahrnehmung und Geschwindigkeitseinschätzung aus der primären Fahraufgabe umzusetzen. Typisch für dieses Anforderungsprofil sind statische Landschaftsdatenbanken, die konzeptbedingt global konsistent sind und daher keine Einschränkungen hinsichtlich der merkmalsreichen Gestaltung des Fernbereichs besitzen. Wenn die Situationserzeugung abhängig vom Verhalten des Fahrers sein soll, so ist zwingend eine dynamische Datenbasis zu verwenden. Diese Anforderung erschließt sich unmittelbar aus der für die Anlage vorgesehenen Anwendung.

Zum Test von Fahrerassistenzsystemen ist es notwendig, Verkehrsszenarien flexibel erzeugen zu können. Auf die entsprechenden Möglichkeiten zur Einflussnahme auf Datenbasis und Verkehrssimulation ist größter Wert zu legen.

Gesamtkonzept

Aus den Anforderungen ergeben sich zwei mögliche Gesamtkonzepte (Tabelle 5-4, Abbildung 5-7). Bei gleicher Funktionalität und leichten Einschränkungen in der Beschleunigungsdarstellung bietet ein Fixed-Screen Simulator mit einem Standard-Bewegungssystem und geringen Verfahrwegen ein sehr gutes Aufwand-Nutzen Verhältnis. Ein Flying-Screen Aufbau mit Standard-Bewegungssystem und großen Verfahrwegen ermöglicht hingegen eine hochwertigere Umsetzung von fahrdynamischen Hinweisreizen und den verstärkten Einsatz der Nei-

gungssimulation. Die Flying-Screen Variante erfordert jedoch einen erheblich höheren Invest bei qualitativ gleichem Anwendungsspektrum. Sie sollte nur gewählt werden, wenn vorrangig fahrdynamisch wirksame Fahrerassistenzsysteme untersucht werden sollen, die über das Konzeptstadium hinaus sind.

Fertigkeitsbasierte Stabilisierung				
Sichtsimulation (rot)				
Augabstand: A2	Sichtbereich: B3/B4	Stereosehen: (C1)	Headtracking: (D1)	Rückspiegel: E2/E3
Kontinuität: F3	Auflösung: G2	Bildberechnung: H1	Projektoren: J2	
Bewegungssimulation (schwarz)				
BWS < 6 DOF: --	Standard BWS: L1/L4	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N2	Reifen: O2
Geräuschsimulation (blau)				
Primäre Geräusche: P1 (P2)		Sekundäre und tertiäre Geräusche: Q1, Q2		Konzept: R2, R3
Fahrstand, MMS (magenta) , U/V abhängig vom Versuch				
Fahrzeug: S3, S4	MMS: T3	Lenkung: U1	Fahr-, Bremspedal: V2	
Datenbasis, AV (grün)				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y3	Verkehr: Z2	Einzelfahrzeuge: AA1, AA2, AA3	

Tabelle 5-4: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regelbasierte, sekundäre Aufgaben

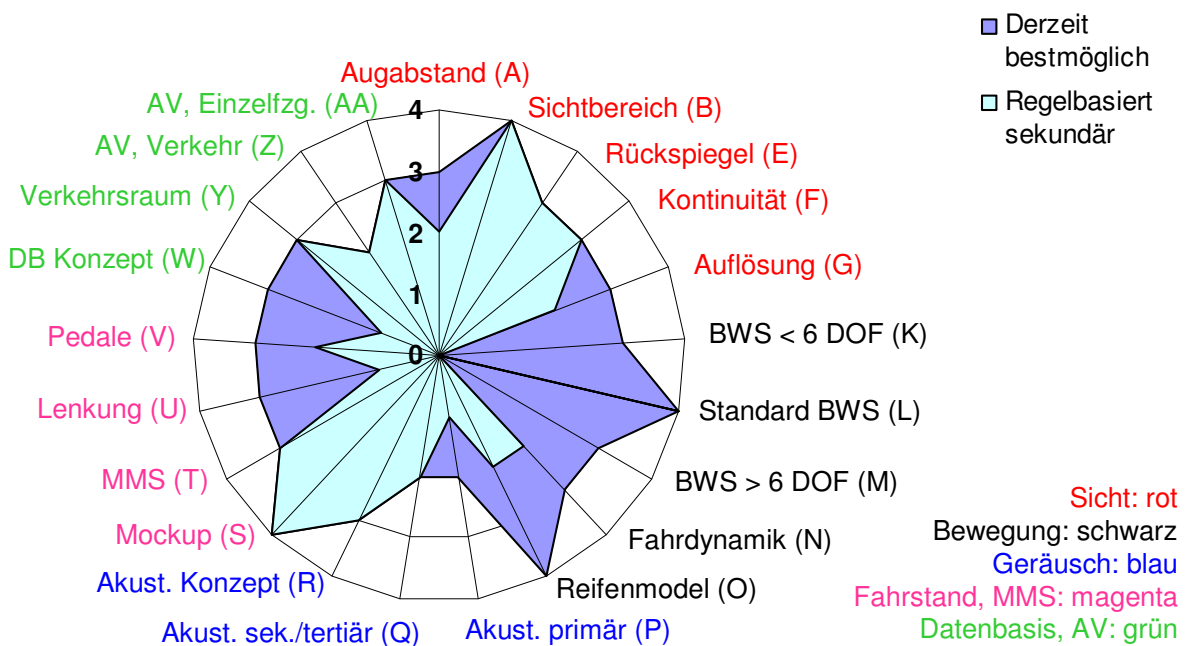


Abbildung 5-7: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regelbasierte, sekundäre Aufgaben

5.3.5 Wissensbasierte sekundäre Aufgaben

Gemäß der getroffenen Klassifizierung sind hier die zu testende Funktion und ihre Auswirkungen auf den Fahrvorgang dem Fahrer weitestgehend unbekannt. Im Bereich der Vorentwicklung stehen die Prüfung von Konzepten und die Festlegung von Funktionen und Merkmalen im Zentrum der Untersuchungen. Es können Aussagen zur Akzeptanz und erste Hinweise auf das Zusammenspiel von Fahrer und FAS erlangt werden. Die Abweichungen der vom Simulator erzeugten Fahraufgabe dürfen also größer sein als wenn der Test Aussagen über die Praxistauglichkeit eines FAS liefern soll. Das Anforderungsprofil ist entsprechend ähnlich dem für regelbasierte sekundäre Aufgaben. Änderungen betreffen in erster Linie das Bewegungssystem.

Gesamtkonzept

Trotz der o.g. Einschränkungen handelt es sich um einen Aspekt der sekundären Fahraufgabe. Ein gutes Präsenzempfinden und eine einfache Darstellung vestibulärer Hinweisreize über die Funktion der FAS durch die Nachbildung der Aufbaubewegungen verbessern die Güte der Versuchsergebnisse. Die Anforderungen an Sicht, Geräuschsimulation, Fahrstand und Datenbasis können im Wesentlichen übernommen werden. Allein für die Bewegungssimulation kann aus den genannten Gründen ein Fixed-Screen Konzept mit Standard-Bewegungssystem und geringen Verfahrwegen als typisch betrachtet werden (Tabelle 5-5, Abbildung 5-8).

Fertigkeitsbasierte Stabilisierung				
Sichtsimulation (rot)				
Augabstand: A2	Sichtbereich: B3/B4	Stereosehen: (C1)	Headtracking: (D1)	Rückspiegel: E2/E3
Kontinuität: F3	Auflösung: G2 (G3)	Bildberechnung: H1	Projektoren: J2	
Bewegungssimulation (schwarz)				
BWS < 6 DOF: --	Standard BWS: L1	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N2	Reifen: O2
Geräuschsimulation (blau)				
Primäre Geräusche: P1 (P2)		Sekundäre und tertiäre Geräusche: Q1, Q2		Konzept: R2, R3
Fahrstand, MMS (magenta) , U/V abhängig vom Versuch				
Fahrzeug: S3, S4	MMS: T3	Lenkung: U1	Fahr-, Bremspedal: V2	
Datenbasis, AV (grün)				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y3	Verkehr: Z2	Einzelfahrzeuge: AA1, AA2, AA3	

Tabelle 5-5: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für wissensbasierte, sekundäre Aufgaben

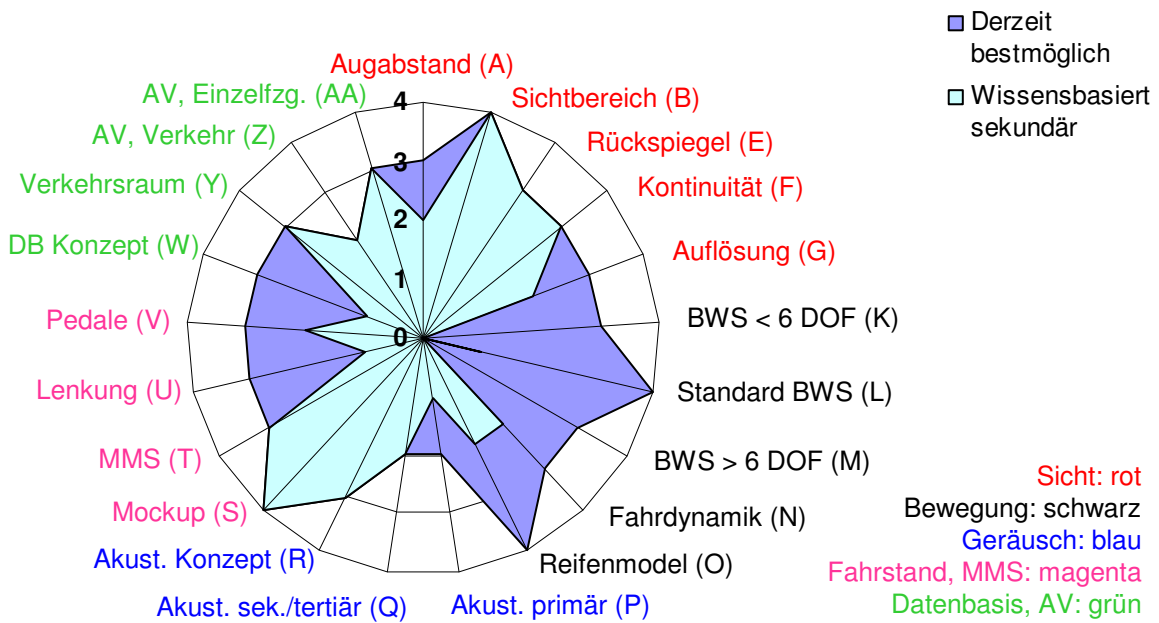


Abbildung 5-8: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für wissensbasierte, sekundäre Aufgaben

5.3.6 Regel- und wissensbasierte tertiäre Aufgaben

Tertiäre Aufgaben auf wissensbasierter Ebene sind beispielsweise neue Infotainmentfunktionen, mit denen der Proband über eine ebenfalls neue Mensch-Maschine-Schnittstelle interagiert. Da dies nicht mit der Fahrsituation in Verbindung steht, ergeben sich größere Freiheitsgrade bei der Aufgabenerfüllung und damit eine höhere Personenabhängigkeit des Verhaltens als bei sekundären Aufgaben. Eine besondere Anforderung an die erzeugte Fahraufgabe ist daher, dass deren Erfüllung möglichst wenig Streuung in die Ergebnisse einbringen darf. Das Fahrzeug sollte also mit den Fertigkeiten eines Normalfahrers möglichst einfach zu fahren sein. Hauptziel der Simulation ist es, eine für den Normalfahrer schnell erlernbare Regelaufgabe bereitzustellen. Ein gutes Präsenzepfinden ist nicht typischerweise erforderlich. Die genannten Randbedingungen sind für regel- und wissensbasierte Aufgaben sehr ähnlich, weshalb ein gemeinsames Profil für diese Anwendungsklassen erstellt wird.

Sichtsimulation

Primäre und sekundäre Fahraufgabe erzeugen lediglich die Grundbeanspruchung bei dieser Klasse von Anwendung. Die Höhe dieser Beanspruchung hängt erheblich von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Wenn also der gesamte Geschwindigkeitsbereich eines PKW abgedeckt werden soll, ist es vorteilhaft, den optischen Fluss gut auszuprägen. Eine unterbrechungsfreie Teilsicht ist daher zu realisieren. Die Bildberechnungsrate darf nicht unter einen Wert von 60Hz absinken, um ein ruckfreies Bild auch bei hohen Geschwindigkeiten zu gewährleisten. Bei tertiären Aufgaben ist die Interaktion mit der Umgebung und die dadurch ständig wechselnde Blick-

zuwendung zwischen Mensch-Maschine-Schnittstelle und Sichtsystem nicht mehr so signifikant Bestandteil des Untersuchungsgegenstands wie bei den sekundären Aufgaben, sodass ein großer Augabstand nicht zwingend erforderlich ist.

Die Umsetzung von Stereosehen und Head-Tracking ist für diese Aufgabe nicht erforderlich. Rückspiegel können zur Verbesserung der Spurhaltung als LC-Display oder als virtueller Rückspiegel implementiert werden. An die Auflösung werden keine speziellen Anforderungen gestellt. Es sollte aber möglich sein, bei einem geringen Augabstand und der resultierenden kleinen Projektionsfläche 2-3 Bogenminuten/Pixel zu realisieren.

Bewegungssimulation

Die Ausführung der Bewegungssimulation soll eine einfache Regelung gewährleisten und das Auftreten der Simulatorkrankheit minimieren. In Versuchen im FTM-Simulator hat sich gezeigt, dass dieses Ziel erreicht werden kann, indem ausschließlich skalierte Aufbaubewegungen dargestellt werden. Diese Art der Bewegungssimulation unterstützt und vereinfacht die Regelaufgabe und minimiert das Auftreten der Simulatorkrankheit. Ein Bewegungssystem mit den drei Aufbaufreiheitsgraden Nicken, Wanken und Huben ist für diese Anwendung ausreichend.

Geräuschsimulation

Die Art der dargestellten Geräusche hängt vom verwendeten Fahrzeug ab. Wenn Gangschaltung und sekundäre Bedienelemente verbaut sind, sind neben den primären Fahrgeräuschen auch diese Zusatzgeräusche zu implementieren. Ziel ist dabei nicht die Verbesserung des Präsenzepfindens, sondern die vereinfachte und damit leicht erlernbare Gestaltung der Regelaufgabe. Die Ausgabe der Geräusche kann mittels Zweikanal-Ton erfolgen. Zusätzliche, geschwindigkeitsabhängige Vibrationen mittels eines Körperschallwandlers sind für die Fahraufgabe hilfreich, aber nicht zwingend erforderlich.

Fahrstand und Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Ausgestaltung des Fahrstandes hängt ausschließlich vom Ziel der Untersuchungen ab. Ein einfacher Fahrstand mit primären und ggf. sekundären Bedienelementen reicht aus, um verschiedene Konzepte von Anzeige, Bedienung und Interaktion zu testen, wie sie im Bereich der Vorentwicklung üblich sind. Wenn das Konzept dagegen festgelegt ist und Aussagen zur Ergonomie und zur Praxistauglichkeit der Mensch-Maschine-Schnittstelle getroffen werden sollen, ist die Verwendung eines Vollfahrzeugs unumgänglich. Nur so können Aussagen über die Handhabung des Systems während der Fahrt unter den Randbedingungen von Package und Sichtverhältnissen getroffen werden. Es sollte auf die Flexibilität der Anzeigen und Bedienelemente geachtet werden. Der Einsatz eines oder mehrerer konfigurierbarer LC-Displays verschafft zusätzliche Flexibilität bei der Implementierung von Anzeigen-Prototypen.

Die Nachbildung der Kräfte an den primären Bedienelementen kann passiv erfolgen. Die Kräfte und Momente sind nicht Gegenstand der Beurteilung und können so realisiert werden, dass die Fahrer die Regelaufgabe möglichst ohne große Eingewöhnung absolvieren können.

Datenbasis und Verkehrssimulation

Eine Verkehrssimulation sollte für diese Klasse von Anwendungen vorhanden sein. Dadurch erhält der Fahrer zusätzliche, aus der Realität bekannte Anhaltspunkte zur Quer- und Längsregelung. Wenn die Beanspruchung des Fahrers durch den Verkehr variiert werden soll, ergeben sich die entsprechenden Anforderungen direkt aus der Anwendung. Die Ausführung als statische, modulare oder dynamische Datenbasis ist für die Güte der Ergebnisse sekundär.

Gesamtkonzept

Da keine Neigungssimulation eingesetzt wird, ist die Ausführung als Fixed-Screen Simulator mit Teilsicht und geringem bis mittlerem Augabstand typisch für die Anwendung. Zur Unterstützung der Regelaufgabe wird ein einfaches 3DOF-Bewegungssystem empfohlen, welches die Aufbaubewegungen nachbildet. Kennzeichnend für dieses Konzept ist der geringe Hardwareaufwand. Die Aufgabenstellung erlaubt es, den Prüfstand so abzustimmen, dass möglichst viele Fahrer möglichst problemlos und ohne Eingewöhnungszeit eine Normalfahrt absolvieren können (Tabelle 5-6, Abbildung 5-9).

Fertigkeitsbasierte Stabilisierung				
Sichtsimulation (rot)				
Augabstand: A1	Sichtbereich: B1 (B2)	Stereoschen: --	Headtracking: --	Rückspiegel: E2/E3
Kontinuität: F2	Auflösung: G2	Bildberechnung: H1	Projektoren: J1	
Bewegungssimulation (schwarz)				
BWS < 6 DOF: K1, K2	Standard BWS: --	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N1	Reifen: O1
Geräuschsimulation (blau)				
Primäre Geräusche: P1		Sekundäre und tertiäre Geräusche: Q1		Konzept: R1
Fahrstand, MMS (magenta), S abhängig vom Versuch				
Fahrzeug: S1, S3	MMS: T3	Lenkung: U1	Fahr-, Bremspedal: V1	
Datenbasis, AV (grün)				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y1	Verkehr: Z1	Einzelfahrzeuge: --	

Tabelle 5-6: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regel- und wissensbasierte, tertiäre Aufgaben

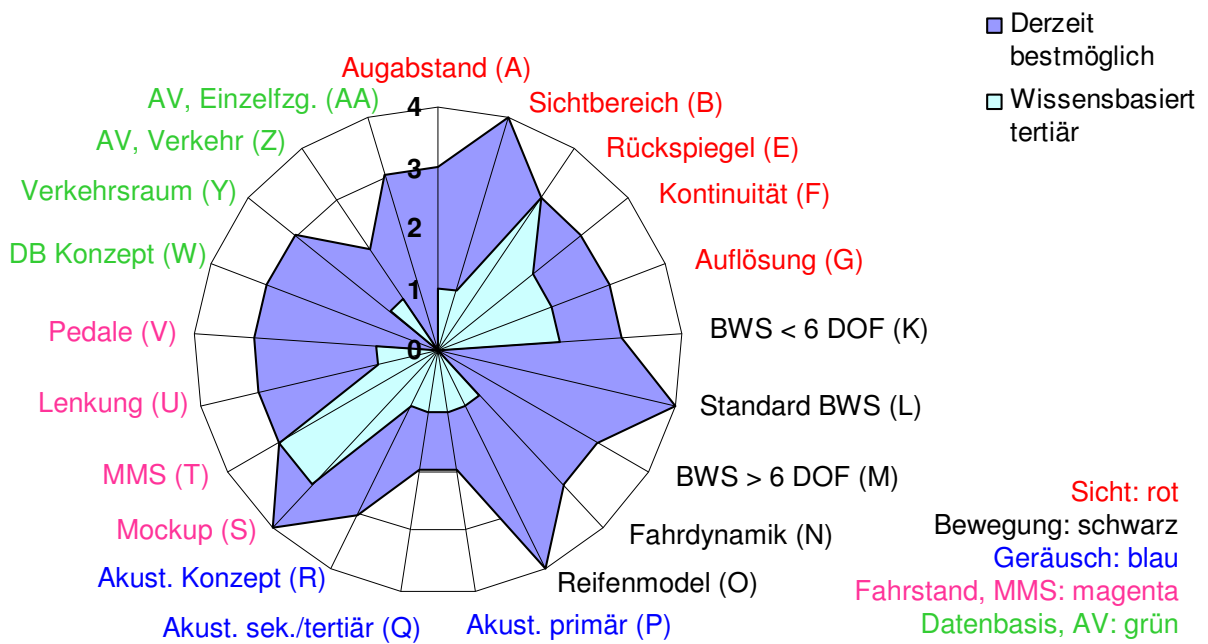


Abbildung 5-9: Fahrsimulator-Anforderungsprofil für regel- und wissensbasierte, tertiäre Aufgaben

Das nächste Kapitel zeigt, wie die vorgestellte Methode am Beispiel des FTM Simulators angewendet wird, wo fallspezifische Anpassungen erforderlich waren, und wie durch Versuchsergebnisse die Methode im praktischen Versuchsbetrieb bestätigt werden konnte.

6 Bestätigung der Methode

Die der Methode zugrunde liegenden Zusammenhänge zwischen Fahrerverhalten und Simulortechnik basieren zum Teil auf Informationen aus der Literatur und wurden mit den Erkenntnissen aus der Entwicklungsarbeit am FTM-Simulator für die Methode angepasst und detailliert. Ein Teil dieser Zusammenhänge wird im Folgenden geprüft und bestätigt. Der erste Schritt ist dabei die Anwendung der Methode am Beispiel des FTM Simulators. Da der Simulator für Untersuchungen zu Fahrerassistenzsystemen und der Mensch-Maschine-Schnittstelle konzipiert wurde, liegt der Fokus dieser Betrachtungen auf sekundären und tertiären Aspekten der Fahraufgabe. Die Ergebnisse werden in Form eines Erfahrungsberichts dargestellt und mit subjektiv und objektiv erhobenen Daten untermauert.

6.1 Anwendung der Methode am FTM-Simulator

Die Festlegung der Untersuchungsschwerpunkte am FTM-Simulator erfolgte zusammen mit den Vor- und Serienentwicklungsabteilung eines Nutzfahrzeugherstellers. Aus dem Bereich der Vorentwicklung wurde der Test von Fahrerassistenzsystemen, aus der Serienentwicklung die Untersuchung von Anzeige- und Bedienelementen der sekundären und tertiären Mensch-Maschine-Schnittstelle als Schwerpunkt definiert. Für den FTM-Simulator sind demnach die Profile 4b, 4c (sekundär, regelbasiert und wissensbasiert) und 5b, 5c (tertiär, regelbasiert und wissensbasiert) relevant. Mittels Recherche, Expertenbefragung und durch die Zusammenarbeit mit dem Simulatorhersteller wurde auf der Basis der geplanten Anwendungen das Konzept des FTM-Simulators spezifiziert. Die Merkmale der Anlage in der heutigen Form sind in Tabelle 6-1 den Ergebnissen aus der Anwendung der Methode gegenübergestellt. Bei mehreren Anwendungsgebieten sieht die Methode die Überlagerung der Anforderungsprofile vor. Die resultierende Summenspezifikation findet sich in Zeile 5 der folgenden Tabelle.

Summenspezifikation aus:				
Sekundär, regelbasiert 4b, sekundär, wissensbasiert 4c und tertiär, regel-/ wissensbasiert 5b/c				
Sichtsimation - Soll				
Augabstand: A2	Sichtbereich: B3/B4	Stereoschen: (C1)	Headtracking: (D1)	Rückspiegel: E2/E3
Kontinuität: F3	Auflösung: G2 (G3)	Bildberechnung: H1	Projektoren: J2	
Sichtsimation – Ist (FTM Simulator)				
Augabstand: A2	Sichtbereich: B3	Stereoschen: --	Headtracking: --	Rückspiegel: E2

Summenspezifikation aus:				
Sekundär, regelbasiert 4b, sekundär, wissensbasiert 4c und tertiär, regel-/ wissensbasiert 5b/c				
Kontinuität: F3	Auflösung: G2	Bildberechnung: H1	Projektoren: J1	
Bewegungssimulation - Soll				
BWS < 6 DOF: --	Standard BWS: L1/L4	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N2	Reifen: O2
Bewegungssimulation – Ist (FTM Simulator)				
BWS < 6 DOF: --	Standard BWS: L1	BWS > 6 DOF: --	Fahrdynamik: N1	Reifen: O1
Geräuschsimulation - Soll				
Primäre Geräusche: P1 (P2)		Sekundäre, tertiäre Geräusche: Q1, Q2		Konzept: R2, R3
Geräuschsimulation – Ist (FTM Simulator)				
Primäre Geräusche: P1		Sekundäre, tertiäre Geräusche: Q1, Q2 *		Konzept: R2, R3
Fahrstand, MMS - Soll				
Fahrzeug: S3 (S4)	MMS: T3	Lenkung: U1	Fahr-, Bremspedal: V2	
Fahrstand, MMS – Ist (FTM Simulator)				
Fahrzeug: S3	MMS: T3	Lenkung: U1/U2	Fahr-, Bremspedal: V1	
Datenbasis, AV - Soll				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y3	Verkehr: Z2	Einzelfahrzeuge: AA1, AA2, AA3	
Datenbasis, AV – Ist (FTM Simulator)				
DB, Konzept: W1	Verkehrsraum: Y2	Verkehr: (Z2)	Einzelfahrzeuge: AA1, AA2, AA3	

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung von Soll- und Ist-Konfiguration des FTM-Simulators. Werte in Klammern sind optional, Alternativen sind durch Schrägstriche getrennt. *) FTM-Simulator: AV-Geräusch ohne Doppler-Effekt

Bei der Gegenüberstellung von Soll- und Ist Konfiguration treten Unterschiede zu Tage, die auf die speziellen Anforderungen eines LKW-Simulators oder projektspezifische Randbedingungen zurückzuführen sind, aber die Tauglichkeit der Anlage nicht beeinflussen. Die einzelnen Punkte werden im Folgenden erläutert:

Merkmal B3/B4: Horizontaler Bildausschnitt

- Spezifikation gemäß der Methode: 360° Rundumsicht
- Konfiguration FTM-Simulator: 210° Vollsicht

Die Realisierung einer Rundumsicht ist nur nützlich, wenn der Fahrer aufgrund der Anwendung den Blick direkt nach hinten wenden muss, was am FTM-Simulator nicht gegeben ist. Die direkte Sicht nach hinten ist zudem beim LKW durch die Konstruktion des Fahrerhauses nicht möglich.

Merkmal C1: Stereoprojektion

- Spezifikation gemäß der Methode: Stereoprojektion
- Konfiguration FTM-Simulator: Merkmal nicht vorhanden

Die Kombination von Edge-Blending und Stereoprojektion ist bislang nicht verfügbar. Die Realisierung einer unterbrechungsfreien Frontsicht mit Bildüberlappung und Edge-Blending ist erheblich höher zu priorisieren als der Nutzen aus der Stereoprojektion für die Stabilisierungsaufgabe. Die Realisierung ist nur dann anzustreben, wenn damit keine Einbußen in der Unterbrechungsfreiheit der Projektion verbunden sind.

Merkmal D1: Head-Tracking

- Spezifikation gemäß der Methode: Head-Tracking
- Konfiguration FTM-Simulator: Merkmal nicht vorhanden

Das Merkmal liefert einen indirekten Beitrag bei der Untersuchung sekundärer Aufgaben, indem es die Positionswahrnehmung und damit die Spurhaltung auf Stabilisierungsebene vereinfacht. Die Technologie des Head-Tracking ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht in einer Form verfügbar, die das Präsenzgefühl des Probanden nicht durch eine Vorrichtung zur Positionserfassung am Fahrerkopf beeinträchtigt. Erfahrungen über den tatsächlichen Nutzen liegen bislang nicht vor. Die Realisierung im Rahmen der weiteren Verbesserung des Simulators kann unter den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Randbedingungen (v.a. Verzögerungsfreiheit) untersucht werden.

Merkmal E3: Konzept Rückspiegel

- Spezifikation gemäß der Methode: Virtueller Spiegel als Alternativlösung zum LC-Display
- Konfiguration FTM-Simulator: LC-Display

Ein virtueller, in die Frontsicht eingeblendeter, Rückspiegel ist als Alternativlösung nur für Augabstände bis ca. 1,5m sinnvoll. Der große Augabstand zum Durchlaufen der realen Akkomodationsstrecke ist für Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle vor dem virtuellen Rückspiegel zu priorisieren. Die Funktionalität hinsichtlich der Zusatzinformation für die Spurhaltung ist mit den implementierten LC-Displays besser gegeben.

Merkmal J2: Projektorenauswahl

- Spezifikation gemäß der Methode: Reaktionsschneller Projektor ohne Verwischungseffekte
- Konfiguration FTM-Simulator: LCD-Projektor mit Verwischungseffekten bei dynamisch veränderten Bildinhalten

Trotz der geringen Reaktionszeit des verwendeten Projektors von 16ms zeigt das Bild beim Abbiegen und bei schneller Kurvenfahrt Verwischungseffekte, die zu Irritationen und zur Simulatorkrankheit führen. Zum Zeitpunkt der Realisierung waren Projektoren mit einer schnelleren Reaktionszeit im Zusammenhang mit der erforderlichen Auflösung von 1400x1050 Punkten im Projektbudget nicht abzubilden. Da entsprechende Fahrsituationen für die vorgesehenen Anwendungen relevant sind, ist die Verbesserung dieses Aspekts anzustreben.

Merkmal L4: Projektionskonzept

- Spezifikation gemäß der Methode: Flying-Screen mit großem Augabstand als Alternativlösung
- Konfiguration FTM-Simulator: Fixed-Screen mit großem Augabstand

Die Flying-Screen Variante erbringt nur dann Vorteile, wenn verstärkt Neigungssimulation eingesetzt werden soll. Da das Konzept der Neigungssimulation erhebliche Nachteile hinsichtlich der Simulatorkrankheit mit sich bringt, ist die Ausführung als Fixed-Screen Konzept in Kombination mit der gewählten Variante der Bewegungssimulation nur mit geringen Nachteilen verbunden. Hinsichtlich des Verhältnisses von Invest und Anwendungsnutzen kann das realisierte Konzept als sehr effektiv bezeichnet werden.

Merkmal N2 und O2: Fahrdynamik- und Reifenmodell

- Spezifikation gemäß der Methode: Zweispurmodell, Reifenmodell mit kombinierter Quer-/Längsdynamik
- Konfiguration FTM-Simulator: Einspurmodell, Reifenmodell ohne kombinierte Quer-/Längsdynamik

Das implementierte Einspurmodell von Zugmaschine und Sattelaufleger ermöglicht nur eine vereinfachte Berechnung der Bahnbewegungen, die den Anforderungen besonders bei dynamischen Manövern und bei Abbiegevorgängen nicht vollständig gerecht wird. Dies schlägt sich negativ in der Subjektivbewertung des fahrdynamischen Verhaltens nieder. Die unzulängliche Modellierung der Aufbaubewegungen ermöglicht nicht die Darstellung der LKW-typischen Hubbewegungen des Fahrerhauses beim Beschleunigen und Bremsen. Diese Nachteile lassen sich auch durch die Abstimmung des Motion-Cueing nicht beheben, da das Fahrzeugmodell keinen entsprechenden Freiheitsgrad besitzt.

Das Reifenmodell ohne kombinierte Längs- und Querkräfte und ohne den Effekt der Reifensättigung im Grenzbereich wird durch ein unrealistisches Verhalten bei schneller Kurvenfahrt und bei dynamischen Fahrmanövern, wie sie beim Test von sicherheitsrelevanten FAS auftreten, negativ spürbar. Die Auswirkungen dieser Nachteile und Verbesserungsvorschläge werden in Kapitel 6.3 erläutert. Die Verbesserung dieses Aspekts durch die Implementierung eines MKS-Fahrzeugmodells in Kombination mit einem 3D-FE-Reifenmodell wird angestrebt.

Merkmal P2: Doppler-Effekt

- Spezifikation gemäß der Methode: Doppler-Effekt (AV-Geräusch abhängig von Differenzgeschwindigkeit)
- Konfiguration FTM-Simulator: AV-Geräusch nur entfernungsabhängig

Die Realisierung eines von der Differenzgeschwindigkeit abhängigen Geräusches der Verkehrssimulation sowie des Doppler-Effekts sind mit den Möglichkeiten der FTM Simulation in Zusammenarbeit mit dem Simulatorhersteller möglich und als Optimierungsschritt bereits vorgesehen.

Merkmal S4: Fahrstand

- Spezifikation gemäß der Methode: Serienfahrzeug als Alternative zum Vollfahrzeug
- Konfiguration FTM-Simulator: Vollfahrzeug

Die Verwendung eines Vollfahrzeugs ist bei LKW-Simulatoren nicht sinnvoll realisierbar. Um das Realitätsempfinden beim Einsteigen nicht negativ zu beeinträchtigen, sind Abdeckungen des Bewegungssystems und der sichtbaren Rechnertechnik am Fahrerhaus mittels eines doppelten Bodens und verschiedener Verkleidungen angedacht und im Zuge der Installation eines neuen Fahrerhauses bereits teilweise realisiert worden.

Merkmal V2: Pedalkräfte

- Spezifikation gemäß der Methode: Krafterzeugung adaptiv, Kennlinien parametrierbar
- Konfiguration FTM-Simulator: Krafterzeugung passiv, verstellbar

Die Pedalkräfte werden passiv erzeugt und sind daher nicht verstellbar. Es zeigen sich die bereits beschriebenen Effekte des Überbremsens und der Beschleunigung mit Volllast, die in der Realität nicht typisch sind. Im Verlauf der Untersuchungen stellt sich heraus, dass die Probanden stärkere Pedalkräfte bevorzugen. Da die Anpassung der Pedalkräfte bei Untersuchungen zu sekundären und tertiären Aufgaben zulässig ist, kann eine von der Realität abweichende Pedalkraft implementiert werden.

Merkmal Y3: Online-Konfiguration Datenbasis

- Spezifikation gemäß der Methode: Datenbasis online und fahrerabhängig konfigurierbar
- Konfiguration FTM-Simulator: Statische Datenbasis, Merkmale nicht konfigurierbar

Schilder und Merkmale der Datenbasis sind weder online noch offline konfigurierbar. Die entsprechende Technologie ist bislang durch den Zulieferer nicht realisiert worden. Ein Nachteil ergibt sich nur für die Flexibilität der Untersuchungen von Fahrerassistenzsystemen, nicht aber für die Güte der Simulation und das Präsenzepfinden. Eine neuere Version der Datenbasis, welche eine höhere Flexibilität besitzt, ist beim Zulieferer verfügbar.

Im Folgenden werden Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchsreihen dargestellt, die die entwickelte Methode bestätigen.

6.2 Sichtsimulation

6.2.1 *Abstands- und Geschwindigkeitswahrnehmung*

Längsdynamisch wirksame FAS bilden einen Schwerpunkt der Untersuchungen am FTM-Simulator. Als charakteristisches Leistungsmerkmal für diese Anwendung werden verschiedene Aspekte der Abstandshaltung durch den Vergleich von Realfahrt und Simulatorfahrt untersucht.

Versuchsablauf

Der Folgefahrtversuch besteht aus den zwei Teilen Realfahrt und Simulatorfahrt, die jeder Proband unmittelbar hintereinander unter nahezu identischen Bedingungen absolviert. Die verwendeten Fahrzeuge sind hinsichtlich Dimensionen und Ausstattung identisch. Die Realfahrt findet auf einer abgesperrten, geraden Versuchsstrecke statt. Vor der Messfahrt werden die Fahrer aufgefordert, sich mit dem Fahrzeug vertraut machen und in einer ersten Fahrt mehrmals zu bremsen und zu beschleunigen. Für die Messung wird vom Fahrer verlangt, dem Führungsfahrzeug (FFZ) so zu folgen, wie er es im normalen Verkehr tun würde. Es werden die in Tabelle 6-2 beschriebenen Manöver durchfahren. Dabei werden die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge und deren Abstand mittels eines verbauten Radarsensors gemessen und aufgezeichnet. Dieses Geschwindigkeitsprofil wird einem LKW-Modell in der FTM Simulation aufgeprägt, und der Proband fährt die gleiche Folgefahrtsituation im Fahrsimulator noch einmal. Nach einer 5-minütigen Eingewöhnungsfahrt im Simulator werden wiederum die Geschwindigkeiten und der Abstand der Fahrzeuge aufgezeichnet. Die Geschwindigkeit des Führungsfahrzeugs wird dabei nicht automatisiert eingestellt, sodass Abweichungen in den Beschleunigungsphasen der einzelnen Probanden auftreten. Da ein quantitativer Vergleich jeweils nur zwischen der Simulator- und der Realfahrt der einzelnen Probanden vorgenommen wird, ergeben sich identische Folgefahrtsituationen, sodass die abgeleitete Aussage nicht verfälscht wird. [204]

Versuch 1 Minimal- und Maximalabstand im Stop & Go Verkehr	Versuch 2 Annäherungsverhalten an ein stehendes Fahrzeug	Versuch 3 Abstandshaltung bei Folgefahrt mit konstanter Geschwindigkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellung EGO-FFZ*): 5m Abstand • Beschleunigen auf 15 km/h, Teillast • Geschw. konstant 10 sec • Komfortbremsung bis 0 km/h • Wieder anfahren nach 10 sec 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellung EGO-FFZ: 15m Abstand • Beschleunigen auf 40 km/h, Teillast • Beschleunigen FFZ bis 60km/h, EGO-Fzg. weiter 40 km/h • Komfortbremsung bis 0 km/h • EGO-Fzg.nähert sich an stehendes FFZ an • Wieder anfahren nach 10 sec 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellung EGO-FFZ: 5m Abstand • Beschleunigung auf 10 km/h, Teillast • 25 sec Folgefahrt bei konst. Geschw. • Geschwindigkeitsabfolge: 10, 30, 10, 40, 40, 30km/h
Daten: 63 Anfahr- und Anhaltevorgänge	Daten: 40 Anfahr- und Anhaltevorgänge	Daten: Je 16 Messungen bei 10, 30, 40km/h

Tabelle 6-2: Versuchsablauf für die Validierung des Abstands- und Geschwindigkeitsverhaltens

Ergebnisse Versuch 1: Minimal- und Maximalabstand im Stop&Go Verkehr

Abbildung 6-1 zeigt beispielhaft den Geschwindigkeitsverlauf der ersten Übung und die dabei auftretenden Abstände zwischen Führungsfahrzeug und Ego-Fahrzeug. Im Simulator werden tendenziell größere Abstände zum Führungsfahrzeug eingehalten als in der Realität. Die Abweichung nach oben beträgt für den Minimalabstand ca. 32% und für den Maximalabstand ca. 13%.

Diese Effekte sind qualitativ aus der Literatur bekannt. Sie werden durch die Versuchsreihe bestätigt und für den FTM-Simulator quantifiziert. Die relativ große Abweichung beim Minimalwert der Annäherung kann durch die Abbildungsvorschrift der Projektion begründet werden. Die Abbildung ist winkel- und nicht längentreu, sodass bei kleinen Abständen Objekte breiter dargestellt werden als in der Wirklichkeit.

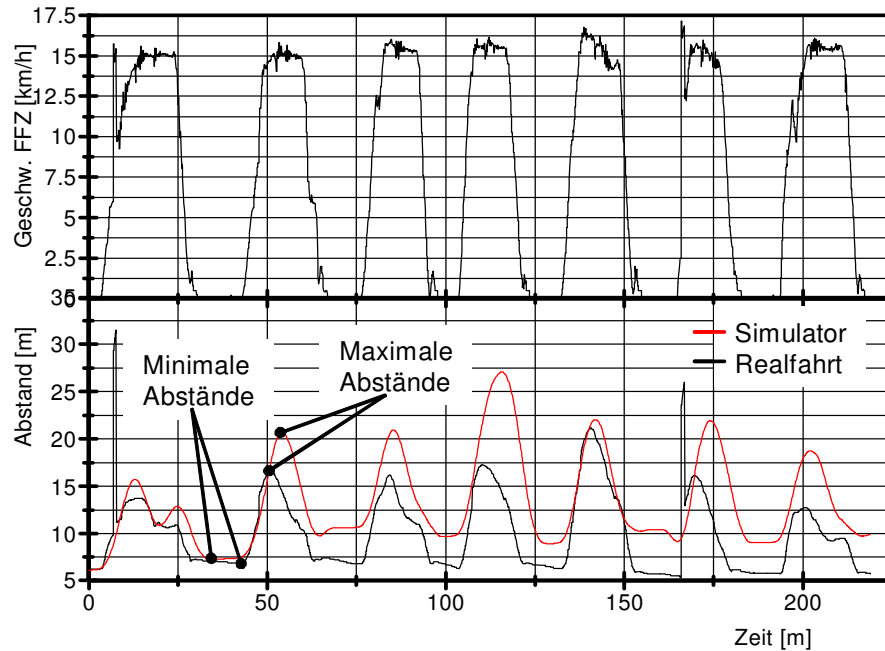


Abbildung 6-1: Stop & Go-Folgefahrt – Beispielhafter Verlauf von Geschwindigkeit Führungsfahrzeug und Abstand EGO-FFZ bei Realfahrt und Simulation

Die statistische Auswertung aller acht Fahrer wird in Abbildung 6-2 zusammengefasst. Für diese Auswertung wurden die Mittelwerte der Minimal- und Maximalabstände aus Real- und Simulatorfahrt gebildet. Es zeigt sich, dass Fahrer, welche in der Realität größere Abstände einhalten, dieses Verhalten tendenziell auch in der Simulation beibehalten.

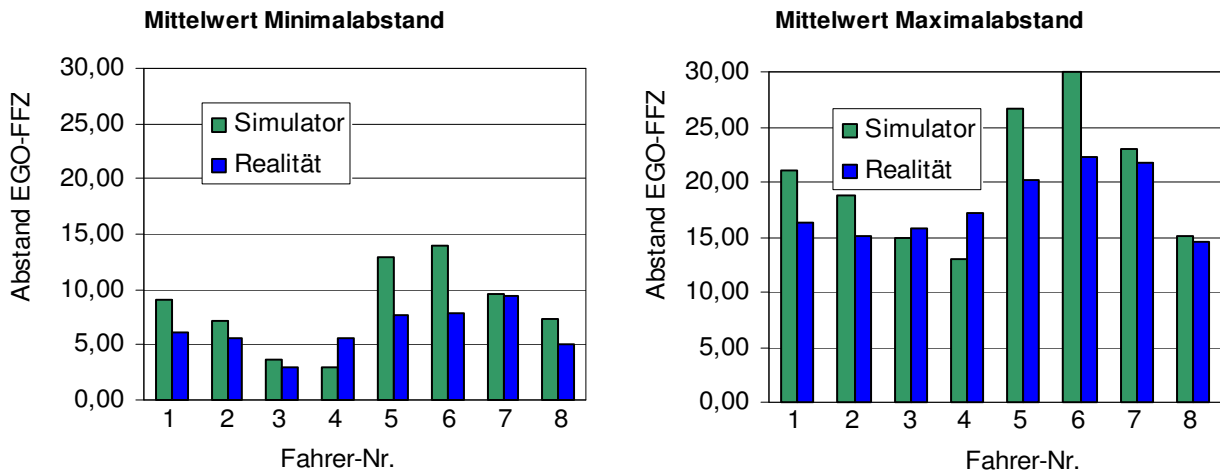


Abbildung 6-2: Mittelwerte der Minimal und Maximalabstände für das Folgefahrt-Szenario 1

Statistische Auswertung Minimalabstände:

- Mittelwert gesamt Realität: 6,29 m
- Standardabweichung: 0,69
- Mittelwert gesamt Simulator: 8,31 m
- Standardabweichung: 1,01

Statistische Auswertung Maximalabstände:

- Mittelwert gesamt Realität: 17,87 m
- Standardabweichung: 2,42
- Mittelwert gesamt Simulator: 20,29 m
- Standardabweichung: 3,13

Die Sichtsimulation liefert für den antizipatorischen Aspekt des Beschleunigens und des Bremsens einen qualitativ schlechteren Reiz als die Realfahrt. Die Betätigung von Fahrpedal und Bremse erfolgt daher im Durchschnitt 0,66 (Anfahren) bzw. 0,51 (Bremse) Sekunden später als in der Realität (Abbildung 6-3). Auch diese Beobachtung wird durch verschiedene Veröffentlichungen bestätigt und zeigt die Richtigkeit der Annahmen über die Abhängigkeit der Antizipation von der Sichtsimulation.

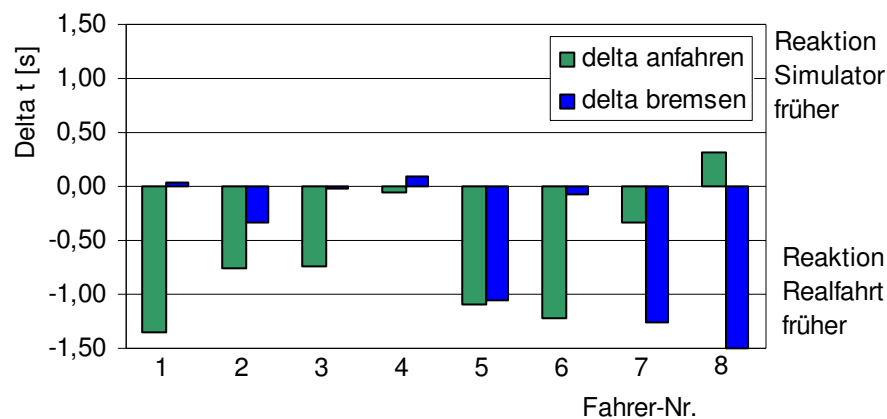


Abbildung 6-3: Reaktionszeiten für die Betätigung von Fahrpedal und Bremse

Ergebnisse Versuch 2: Annäherungsverhalten an ein stehendes Fahrzeug

Bei der nächsten Übung wird das Annäherungsverhalten an ein stehendes Fahrzeug betrachtet. Als Maß für den Vergleich zur Realfahrt wird die Differenzgeschwindigkeit gewählt. Sie repräsentiert den antizipatorischen Mechanismus der Bildung der Time-to-Collision auf der Basis optischer Informationen. Die Probanden korrigieren die Bremsung im Simulator häufiger als in der Realität. Dieser bekannte Effekt der Ungleichmäßigkeit der Stabilisierungsreaktion entsteht durch die mangelhafte Bewegungssimulation. Der Effekt ist für die geplanten Untersuchungen sekundär, da bei den geplanten späteren Untersuchungen das FAS diese Regelung übernehmen soll. Der Fahrer soll dabei in erster Linie die Abstandshaltung beurteilen.

Abbildung 6-4 zeigt den Verlauf der Differenzgeschwindigkeiten. Der Offset zwischen den Verläufen der Differenzgeschwindigkeiten aus Simulator- und Realfahrt zeigt einen zeitlich versetzten Bremsbeginn an, wobei der Versatz nicht systematisch gerichtet ist und daher nicht auf die Simulation zurückgeführt werden kann. Die Abnahme der Differenzgeschwindigkeiten bei der Annäherung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Trotz der im Simulator schwierigeren und ungleichmäßigeren Regelung am Bremspedal sind die Fahrer in der Lage, auf der Basis der visuellen Informationen einen zur Realfahrt nahezu identischen Verzögerungsverlauf einzustellen. Auch die absolute Höhe der Differenzgeschwindigkeiten ist sehr gut vergleichbar. Der Untersuchungsgegenstand ist hauptsächlich antizipatorisch bestimmt, sodass trotz Mängeln bei der Stabilisierung hinreichend valide Ergebnisse möglich sind. Entsprechende Ergebnisse sind auch aus der Literatur bekannt [47, 73]. Die Ergebnisse zeigen die Richtigkeit der Annahme, dass auch für die Untersuchung von fahrdynamisch wirksamen FAS eine stark skalierte Bewegungssimulation ausreichend sein kann.

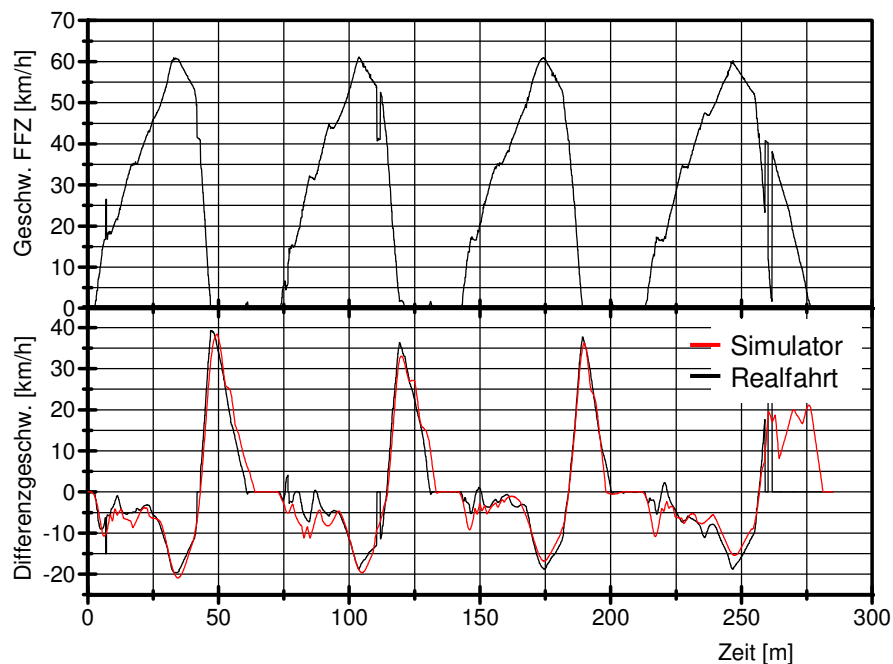


Abbildung 6-4: Folgefahrt und Annäherung an ein stehendes Fahrzeug; beispielhafter Verlauf von Geschwindigkeit Führungsfahrzeug und Differenzgeschwindigkeiten EGO-Führungsfahrzeug

Ergebnisse Versuch 3: Abstandshaltung bei Folgefahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Zur Validierung der Abstandshaltung bei stautypischen Geschwindigkeiten wird ein quasistationäres Folgefahrtszenario getestet. Als Maß für den Vergleich zur Realfahrt wird der Abstand zum Vorfahrenden gewählt. Er repräsentiert den antizipatorischen Aspekt des Sekundenabstands. Das Führungsfahrzeug fährt mit konstanten Geschwindigkeiten von 10, 30 und 40 km/h für eine Dauer von je 25 Sekunden. Jeder Fahrer fährt abwechselnd jede dieser Geschwindigkeiten zwei Mal.

Um den Einfluss des Einschwingvorgangs unmittelbar nach dem Wechsel von einer Führungsgeschwindigkeit zur nächsten zu minimieren, erfolgt die Auswertung erst ca. 8 Sekunden nachdem das Führungsfahrzeug die konstante Geschwindigkeit erreicht hat (Abbildung 6-5). Aus den letzten ca. 17 Sekunden der Konstantfahrphase wird dann der Mittelwert des Abstands gebildet.

Auch bei dieser Versuchsanordnung wird in der Simulation im Mittel ein größerer Abstand eingehalten als in der Realität. Die Abweichungen der Abstandswerte im Simulator bewegen sich im Bereich von 10 bis maximal 25% der Abstände aus der Realfahrt. Diese Werte sind als Maximalwerte zu sehen, da bei einem der Fahrer Probleme bei der Fahrzeugbedienung auftreten, sodass sich ein sehr großer Abstand zum Führungsfahrzeug einstellt, der nicht durch die Simulationsqualität bestimmt war. Wird dieser Proband in der Auswertung nicht berücksichtigt, verringern sich die prozentualen Abweichungen auf Werte zwischen 0 und 12 %. Die Abweichungen

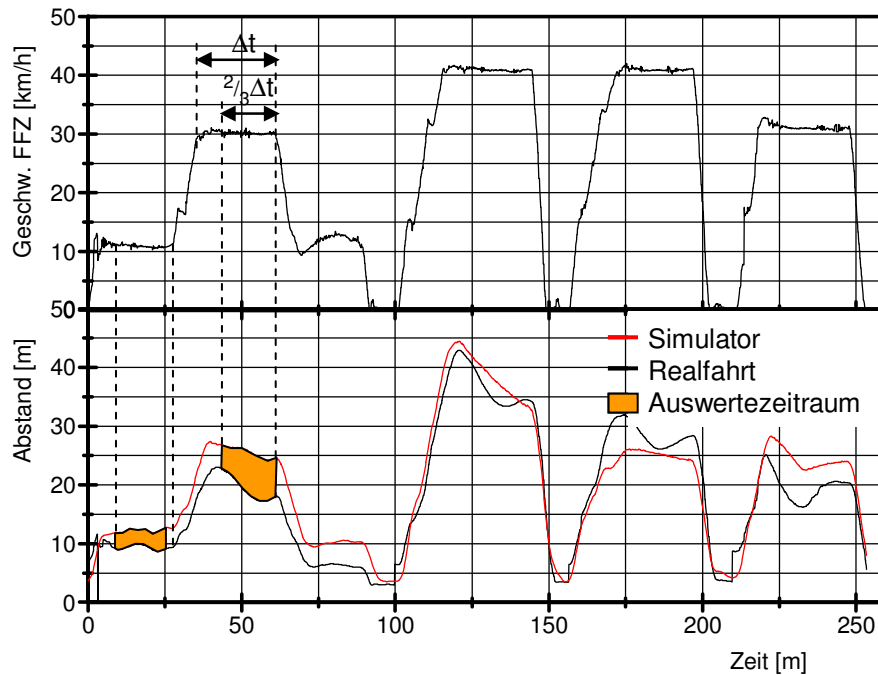


Abbildung 6-5: Folgefahrt mit konstanter Geschwindigkeit – Beispielhafter Verlauf von Geschwindigkeit Führungsfahrzeugs und Abstand EGO-Führungsfahrzeug

sind bei höheren Geschwindigkeiten prozentual geringer als bei niedrigen. Dies ist einerseits bedingt durch die bereits angesprochene, nicht maßstabgetreue Darstellung des Führungsfahrzeugs bei geringen Abständen (und entsprechend geringen Abständen), bestätigt aber andererseits die getroffenen Annahmen zur Positionswahrnehmung im Nahbereich. Die Implementierung von Stereosehen und Head-Tracking könnte für diesen Aspekt eine Verbesserung bewirken. Basierend auf diesen Ergebnissen kann die Abstands- und Geschwindigkeitseinschätzung im FTM-Simulator als sehr gut eingestuft werden, was die in der Methode verwendeten Annahmen hinsichtlich der Bilderzeugung bestätigt.

Vergleich mit anderen Veröffentlichungen

Versuche zur Abstandseinhaltung wurden auch am Fahrsimulator des IZVW Würzburg durchgeführt [17]. Dabei handelt es sich um eine PKW Fahrsimulation mit Flying-Screen und Neigungssimulation. Aus folgenden Gründen ist eine für eine halbquantitative Gegenüberstellung ausreichende Vergleichbarkeit gegeben:

- Bewegungsinformationen sind wichtig für die Gleichmäßigkeit, nicht aber für die absolute Höhe der Abstandsregelung. Der Einfluss der unterschiedlichen Bewegungssysteme ist daher als gering einzustufen.
- Es wird darauf verzichtet, die Testsituationen dynamisch zu gestalten, da das Abstandsverhalten und nicht das Brems- und Beschleunigungsverhalten untersucht werden sollte.
- Die Tatsache, dass es sich um Versuchsreihen mit LKW bzw. PKW handelt, ist sekundär, da die Auswertung mit normierten Abständen erfolgt.

In der Würzburger Fahrsimulation werden Abweichungen in der Abstandshaltung von bis zu 100% festgestellt, wobei die geringere Bildauflösung als wesentlicher Einflussfaktor für diese Unterschiede gelten kann. Die physikalische Bildauflösung beträgt bei der FTM Simulation minimal 2,35 Bogenminuten/Pixel im Zentrum eines Projektionsbereichs. Der entsprechende Wert der Würzburger Fahrsimulation liegt zum Zeitpunkt der Untersuchungen mit ca. 3,52 Bogenminuten/Pixel um 49% über diesem Wert. Diese Gegenüberstellung kann aufgrund der Einschränkungen in der Vergleichbarkeit nicht die Quantifizierung des Zusammenhangs zum Ziel haben. Für einen direkten quantitativen Vergleich sind ein identischer Versuchsplan und eine Fahrerstickprobe erforderlich, die nach vergleichbaren Kriterien ausgewählt wurde. Vielmehr wird bestätigt, dass die im Ansatz empfohlene Investition in die Bildauflösung unmittelbar eine Verbesserung der Regelung zur Folge hat. Für weitere Versuche zum Zusammenhang zwischen Abstandshaltung, Auflösung und Bildausschnitt s.a. [78].

6.2.2 Verwischungseffekte des Projektors

Für die Auswahl des Projektortyps resultieren aus der Konstruktion feste Randbedingungen hinsichtlich Auflösung, minimaler Helligkeit, Verfügbarkeit von Weitwinkel-Zoomobjektiven und der erforderlichen Einbaulage. Diese Anforderungen werden zum Zeitpunkt der Spezifikation nur von einem Gerät erfüllt, welches aber die Anforderungen an Lichtleistung bzw. Einbaulage nicht erfüllen kann. Das Kriterium der Reaktionszeit der Projektoren, kann daher nicht berücksichtigt werden.

Bei einer Befragung von Probanden zur Sichtsimulation [203], wird der Verwischungseffekt mit einer Bewegungsunschärfe bei Abbiege- und schnellen Kurvenmanövern beschreiben. Ohne explizite Nachfrage tritt während oder unmittelbar nach einem Abbiegemanöver oft eine spontane Unmutsbekundung auf. Der Effekt ist in merkmalsreicher Umgebung mit geringen Abständen zu den umgebenden Objekten, wie z.B. im Stadtbereich besonders stark ausgeprägt, da hier ein großer Anteil des sichtbaren Bildbereichs bewegt wird. Mit der bestehenden Hardware existiert keine Abhilfe für dieses Problem, sodass der Effekt in der Versuchsdurchführung berücksichtigt werden muss. Untrainierte Probanden werden angewiesen, langsam abzubiegen und erst nach einer Eingewöhnungsfahrt mit Abbiegevorgängen konfrontiert.

Es ist zu vermuten, dass der Effekt durch die nicht vorhandene Darstellung der Gierbewegung verstärkt wird. Da das Bewegungssystem des FTM Simulators die Darstellung von Gierbewe-

gungen erlaubt, sollte diese Unzulänglichkeit weiter untersucht werden, um vorhandenes Optimierungspotenzial auszuschöpfen.

6.3 Bewegungssimulation und Fahrdynamikmodell

Der Beitrag der Bewegungssimulation zur Simulationsgüte ist in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. An dieser Stelle werden die Einschränkungen hinsichtlich der Anwendung durch das Fahrdynamik- und Reifenmodell des FTM-Simulators beschreiben.

6.3.1 Fahrdynamikmodell

Der Schwerpunkt liegt auf den Gegebenheiten, die bei der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen und der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu berücksichtigen sind.

Diagonales Ein- und Ausfedern des Fahrerhauses

Der Hauptnachteil des am FTM-Simulator verwendeten Fahrdynamikmodells besteht in der Darstellung des Fahrerhauses als Masse, die mit dem Fahrgestell nur durch ein Feder-Dämpfer-Element verbunden ist, statt wie in der Realität durch vier Feder-Dämpfer-Elemente. Dadurch kann das bei Manövern mit kombinierter Quer- und Längsdynamik in der Realität auftretende diagonale Ein- und Ausfedern des Fahrerhauses nicht dargestellt werden. Diese Beurteilung drückt sich in der Beanstandung der Bewegungssimulation beim Abbiegen und bei Slalomfahrten aus [203].

Hubbewegung des Fahrerhauses beim Beschleunigen

Ein weiterer Nachteil ist die Tatsache, dass das Fahrgestell gegenüber der Fahrbahn keinen Freiheitsgrad in Richtung der Fahrzeughochachse besitzt und die Radaufhängungen der vier Räder des Fahrgestells nicht nachgebildet sind. Durch diesen Mangel kann das für den LKW typische Huben des Fahrgestells bei der Beschleunigung nicht dargestellt werden. Dieser Effekt ist im Realfahrzeug besonders ausgeprägt, wenn bei Vollastbeschleunigung hohe Antriebsmomente auftreten. Beim Bremsen dagegen fällt die Tauchbewegung des Fahrgestells weniger stark aus und der Fahrer nimmt hauptsächlich das Nicken des Fahrerhauses wahr.

Einschränkung hinsichtlich der Anwendung

Das Fahrdynamikmodell des FTM Simulators erlaubt zusammen mit der verwendeten Abstimmung des Bewegungssystems die Nachbildung einer bei Normalfahrt ausreichend realitätsnahen, primären Fahraufgabe. Untersuchungen in Zusammenhang mit der primären Fahraufgabe sind mit den beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich des Fahrdynamikmodells nicht sinnvoll. Auch Untersuchungen hinsichtlich sekundärer und tertiärer Aufgaben sollten nur bei Normalfahrt erfolgen. Für die Untersuchung sekundärer und tertiärer Aufgaben bei fahrdynamisch anspruchsvolleren Aufgaben ist die Qualität der Bewegungssimulation nicht ausreichend.

Darstellung von Gierbewegungen

Bei Abbiegevorgängen und bei enger Kurvenfahrt können hohe Giergeschwindigkeiten auftreten. Die Verstärkung der entsprechenden Gierbewegung in der Bewegungssimulation wird von fahrdynamisch versierten Fahrern positiv beurteilt, erweisen sich aber mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten des Motion-Cueings als nicht zielführend. Aufgrund der geringen Verfahrrwege ist eine schnelle Rückföhrbewegung erforderlich, die bei Abbiegemanövern eine qualitativ falsche Bewegungsinformation erzeugt. Diese Erkenntnisse wurden im Verlauf der Inbetriebnahme bei der Einstellung des Motion-Cueings gewonnen. Eine Verstärkung der Gierbewegungen und der translatorischen Darstellung der Beschleunigungen, die zur Verbesserungen einzelner Fahrsituationen (z.B. Slalomfahrt), führten, müssen aufgrund der Verschlechterung von Manövern mit geringerer Frequenz (z.B. Abbiegemanöver) wieder rückgängig gemacht werden.

Bei der jetzigen Abstimmung des Motion-Cueings werden daher keine Gierbewegungen dargestellt. Ein weiterer Grund für die Eliminierung der Gierbewegung ist die oben angesprochene Modellierung der Fahrerhausaufhängung, die kein diagonales Einfedern zulässt und die Gierbewegung deshalb als reine Drehbewegung um die Hochachse darstellt wird. Da der Drehpunkt des Bewegungssystems in der Nähe des Fahrerrumpfes liegt, entsteht bei Slalomfahrt das subjektive Empfinden, um die Hochachse des Rumpfes hin- und hergedreht zu werden.

6.3.2 Versuchsspezifisches Motion-Cueing

Das Auftreten der Simulatorkrankheit und der individuelle Umgang mit den Symptomen sind stark personenabhängig. Der Einfluss auf das Fahrverhalten kann nicht quantifiziert werden. Der Proband wird sein Fahrverhalten so adaptieren, dass die Übelkeit erzeugenden Sinnesreize ausbleiben. Eine langsamere Fahrt mit geringerer Quer- und Längsdynamik wird meist die Folge sein. Wenn es hinsichtlich der Auswirkungen auf die primäre Fahraufgabe vertretbar erscheint, ist ein auf den Untersuchungsgegenstand abgestimmtes Motion-Cueing denkbar.

Die Vorbereitungen einer Versuchsreihe zu einem Längsdynamikregelsystem für Stausituationen am FTM-Simulator zeigten, dass bei den häufigen Anfahr- und Anhaltevorgängen vermehrt Simulatorkrankheit auftritt. Eine Verbesserung der Verträglichkeit wird erzielt, indem der Verstärkungsfaktor der Nickbewegung zwischen 0 und $2^m/s$ Fahrgeschwindigkeit von 0,3 auf 0,15 reduziert wird. Dadurch wird die Nickbewegung des Fahrerhauses bei den Anfahr- und Anhaltevorgängen reduziert. Da nicht das Regelverhalten des FAS im Vordergrund der Beurteilung steht, ist dieser Eingriff zu Gunsten der Verträglichkeit zulässig.

6.4 Geräuschsimulation

Bei verschiedenen Versuchsreihen werden die Probanden, unabhängig vom eigentlichen Untersuchungsgegenstand, auch um eine Beurteilung der Gesamtsimulation gebeten. Der folgende Erfahrungsbericht fasst diese subjektiven Urteile zusammen. Die Kritikpunkte bestätigen die in

den vorherigen Kapiteln entwickelten Anforderungen an einen LKW-Entwicklungssimulator für sekundäre und tertiäre Aufgaben.

Vollständigkeit der Geräuschkulisse

Im Zuge mehrerer Versuchsreihen zu Fahrerassistenzsysteme wurde auch eine Beurteilung der Qualität der Gesamtsimulation erhoben [204, 205]. Es zeigt sich, dass die Probanden auf die Unvollständigkeit der Geräuschsimulation sensibel reagieren und Abweichungen vom Realfahrzeug unmittelbar wahrgenommen und benannt werden können. Dieser Prozess beginnt mit den Strömungsgeräuschen des luftgefederten LKW-Sitzes, sobald der Fahrer im Fahrzeug Platz nimmt. Das Geräusch wird von vielen Probanden wahrgenommen und positiv kommentiert. Gleiches gilt für die Klickgeräusche der Relais, wenn die Zündung eingeschaltet wird sowie für das hörbare Austreten von Pressluft beim Lösen der Feststellbremse. Ebenso sensibel wird bemerkt, dass im Realfahrzeug Betätigung und Lösen der Betriebsbremse mit Strömungsgeräuschen verbunden sind, welche im FTM-Simulator fehlen. Die für die Spezifikationsmethode verwendete Anforderung nach der Vollständigkeit der sekundären Geräuschkulisse entsprechend dem Originalfahrzeug wird demnach bestätigt. Die Umsetzung dieser Anforderung ist meist kostengünstig und bietet daher ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Motorengeräusch

Bei einer Versuchsreihe zur subjektiven Bewertung der Geräuschsimulation durch LKW-Experten [203] wurde in 10 von 12 Fällen die Qualität und die Lautstärke des Motorengeräuschs am FTM-Simulator als unrealistisch beurteilt. Konkret wird beanstandet, dass das Geräusch zu leise ist und nicht dem eines großvolumigen Dieselmotors entspricht. Der nachfolgende, subjektive Hörvergleich mit dem Realfahrzeug ergibt dagegen eine gute Übereinstimmung der Motorgeräusche zwischen Realfahrzeug und Simulation.

Das Geräusch des Realfahrzeugs wird im Fahrsimulator also als unrealistisch beurteilt. Die Ursachen dieser offensichtlich veränderten Erwartungshaltung der Probanden gegenüber der Geräuschkulisse in der Simulation und die Konsequenz für die Methode werden im Folgenden erläutert.

Die im FTM-Simulator verwendeten Soundsamples des Motorengeräusches stammen aus einer im Akustiklabor angefertigten Aufnahme des Realfahrzeugs. Da die Lautsprecher im Simulator innerhalb der Kabine angeordnet sind, wurde das Geräusch auch im Inneren der Kabine aufgezeichnet. Im Realfahrzeug sind die Motorgeräusche durch die bei neuen Fahrzeugen üblichen Komfortmaßnahmen stark abgedämpft. Das charakteristische Geräusch des Dieselmotors ist im Realfahrzeug nicht mehr unverfälscht hörbar.

Ein Versuch, die Beurteilung der Geräuschsimulation zu verbessern, ist die Aufnahme der Motorgeräusche des Realfahrzeugs mit einem außerhalb der Fahrerkabine platzierten Mikrofon. Die bislang verwendeten Soundsamples werden durch diese ersetzt. Die beiden Versionen der Motorgeräusche werden subjektiv durch Befragung und objektiv durch eine Frequenzanalyse gegenübergestellt [206].

Das neue Motorengeräusch wird subjektiv spontan positiv beurteilt. Es wird als charakteristisch für einen LKW-Motor bezeichnet und es ermöglicht einfacher eine Aussage über die Drehzahl und den Lastzustand des Fahrzeugs. Der Vergleich der Frequenzinhalte offenbart deutliche Unterschiede zwischen den beiden Varianten. Es wird beim Durchgang durch die Kabinenwand offensichtlich nicht nur der Pegel, sondern der gesamte Frequenzinhalt verändert. Abbildung 6-6 zeigt beispielhaft die Frequenzinhalte für 1000 U/min bei geringer Last. Die Frequenzanalyse wird auch bei den anderen 8 Soundsamples durchgeführt. Es werden folgende, charakteristische Unterschiede deutlich:

- Typisch für einen 6-Zylinder Motor ist ein hoher Pegel im Bereich der 3-ten Motorordnung, da hier jeweils zwei Zündungen erfolgen. Bei einer Drehzahl von ca. $1000 \text{ U}/\text{min}$ liegt diese Frequenz bei $f_1 = (1000 \text{ U}/\text{min} / 60) * 3 = 50 \text{ Hz}$. Bei der Außenaufnahme tritt diese Frequenz stark heraus, was bei der Innenaufnahme nicht der Fall ist (Abbildung 6-6). Bei der Innenaufnahme überdecken die durch die Anregung der akustisch aktiven Flächen der Karosserie entstehenden Sekundärgeräusche das Motorgeräusch im gesamten unteren Frequenzbereich.
- Die für ein Motorengeräusch charakteristischen höheren Motorordnungen treten vor allem bei höherer Last bei der Außenaufnahme deutlich heraus. Auch diese Peaks treten in der Innenaufnahme nicht mehr hervor.
- Während die Außenaufnahme den Frequenzbereich von 500Hz bis ca. 2500Hz abdeckt, ist dieser Bereich in der Innenaufnahme komplett herausgefiltert. Die vielfältigen mechanischen Geräusche sind charakteristisch für den Motor, aber im Innenraum nicht hörbar.

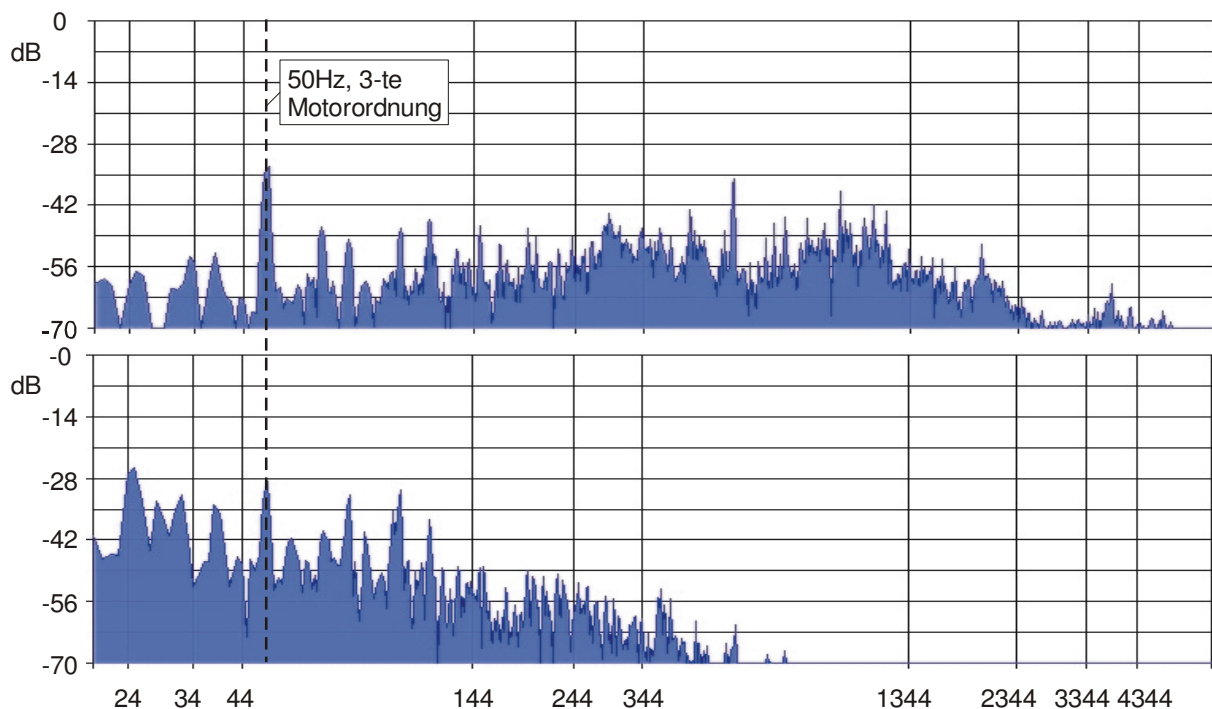


Abbildung 6-6: Frequenzinhalte des Motorengeräuschs, aufgenommen innerhalb des Fahrerhauses (oben) und direkt am Motor; Betriebszustand 1000U/min, ca. 15% Last

Während im Realfahrzeug Komfortaspekte im Vordergrund stehen, empfindet der Fahrer im Simulator eine Geräuschsimulation als hilfreich, wenn dieser Reiz im Vergleich zur Realfahrt verstärkt dargeboten wird und so deutlicher die gewünschten Informationen über den Fahrzustand enthält.

Ähnlich wie beim bereits angesprochenen Bremsverhalten bei der Fahrt im Simulator soll auch hier ein unterrepräsentierter Reiz kompensiert werden, indem ein anderer Reiz verstärkt dargestellt wird. Während im einen Fall der Bremsdruck verstärkt wird, um die stark abgeschwächte Beschleunigung an das reale Niveau anzunähern, wird in diesem Fall versucht, durch das ungefilterte Motorengeräusch zusätzliche Informationen über die Beschleunigung zu erhalten, welche die Bewegungssimulation nicht liefern kann.

Für Untersuchungen zu sekundären und tertiären Bedienungsaufgaben ist durch eine entsprechende Anpassung der Geräuschsimulation nicht mit einer Verfälschung der Versuchsergebnisse zu rechnen.

Verkehrssimulation

Das Geräusch der Verkehrssimulation am FTM-Simulator wird durch die mit der Entfernung abnehmende Verstärkung eines synthetisch erzeugten Motorgeräusches erzeugt. Die Verstärkung beginnt ab einer Entfernung von 20m und erreicht ihr Maximum beim minimalen Abstand vom Ego-Fahrzeug. Diese Modulation ist ausreichend, wenn auf Landstraßen und Autobahnen höhere Differenzgeschwindigkeiten auftreten.

Untersuchungen an aktiven Fahrerassistenzsystemen bedingen die Interaktion mit anderen Fahrzeugen in der unmittelbaren Umgebung des Ego-Fahrzeugs. So hat sich beim Test eines Längsdynamikregelsystems für Stausituationen [204] herausgestellt, dass das am FTM-Simulator realisierte Fremdfahrzeuggeräusch, welches zwar abhängig von der Entfernung, aber nicht von der Differenzgeschwindigkeit ist, für Stausituationen nicht geeignet ist. Befinden sich in einer Stausituation mehrere Fahrzeuge mit geringer Differenzgeschwindigkeit in unmittelbarer Nähe des Ego-Fahrzeugs, tritt ein dauerhaftes Geräusch mit einem für die geringen Motorlasten und Differenzgeschwindigkeiten unrealistisch hohen Pegel auf.

Für die Versuche mit dem FAS muss daher das Geräusch der Verkehrssimulation fast vollständig ausgeblendet werden. Die Verbesserung dieser Komponenten durch Berücksichtigung von Geschwindigkeit, Differenzgeschwindigkeit und Doppler-Effekt wird angestrebt.

6.5 Fahrstand und Mensch-Maschine Schnittstelle

Fahrpedal und Bremse

Die Kraft-Weg-Kennlinie von Fahr- und Bremspedal ist im FTM-Simulator passiv, aber realitätsnah durch Federn bzw. Luftfedern realisiert. Während das Fahrpedal als realitätsnah beurteilt wird, wird die Betätigungskraft des Bremspedals subjektiv als zu gering eingestuft. Bei Untersuchungen zu einem FAS [204] tritt beim Verzögern der aus der Literatur bekannte Effekt des zu

starken Bremsens auf. Zur Verbesserung wird angestrebt, die Kraft-Kennlinie des Bremspedals so abzustimmen, dass eine der Realität besser entsprechende Höhe der Verzögerung erreicht wird. Auch die Veränderung der hinterlegten Pedalkennlinie in Richtung eines progressiven Weg-Bremsdruck-Verlaufs kann hier hilfreich sein.

Lenkung

Eines der Details, welche das Präsenzepfinden stören, wenn sie nicht vorhanden sind, ist die Simulation des sog. Bohrmoments der Lenkung [203]. Der Fahrer ist aus dem Realfahrzeug gewöhnt, auch im Stand ein Moment am Lenkrad zu spüren. Dieses Merkmal ist am FTM-Simulator nicht umgesetzt und kann von den Probanden zu Beginn einer Simulatorfahrt leicht bemerkt werden, die Realisierung dieses Merkmals ist deshalb anzustreben.

6.6 Datenbasis und Verkehrssimulation

Verkehrssimulation und Qualität der Spurhaltung

In einer Versuchsreihe [205] konnte der Beitrag der Verkehrssimulation zur Güte der Querregelung belegt werden. Im Rahmen der Untersuchung eines FAS fahren die Probanden bei einer durch Nebel bedingten Sichtweite von ca. 65m auf einer zweispurigen Fahrbahn. Die Auswertung beruht auf dem Vergleich der Lenkbewegungen über eine Dauer von 2 Minuten, die einmal aus einer Fahrsituation mit und einmal ohne Führungsfahrzeug erfolgt. Während des Auswertungszeitraums wurden die Probanden angewiesen, tertiäre Bedienungsaufgaben durchzuführen.

Darstellung der Ergebnisse

Abbildung 6-7 zeigt beispielhaft den Verlauf der Spurabweichung über der Zeit für einen Fahrer. In dem Diagramm ist der Spurabweichungsverlauf mit bzw. ohne Führungsfahrzeug gegenübergestellt.

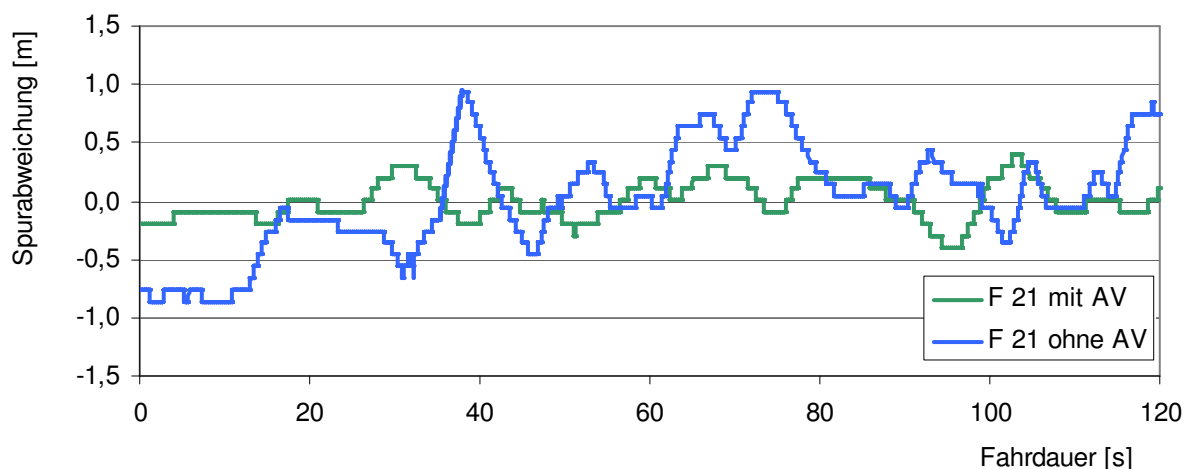


Abbildung 6-7: Beispielhafter Zeitverlauf der Spurabweichungen eines Probanden mit und ohne Führungsfahrzeug

Für die Auswertung wurde zunächst der Mittelwert der betrachteten 120 Sekunden gebildet und die Messwerte um diesen Wert verschoben. Durch diese Normalisierung der Messreihe wird sichergestellt, dass nur die Varianz der Spurabweichung ausgewertet wird und die Eigenheiten einzelner Fahrer, weiter links oder rechts der Spurn mitte zu fahren, nicht in die Betrachtung mit eingeht.

Bei der Fahrt ohne Führungsfahrzeug kann eine erheblich erhöhte Standardabweichung der Messwerte der Spurabweichungen festgestellt werden. Dies gilt ausnahmslos für alle der betrachteten 21 Fahrer der Versuchsreihe (Abbildung 6-8). Bei ansonsten unveränderter Fahr- und Belastungssituation ist es für die Probanden erheblich schwerer, der Fahrspur ohne Führungsfahrzeug zu folgen. Die Fahrer müssen häufiger und stärker lenken.

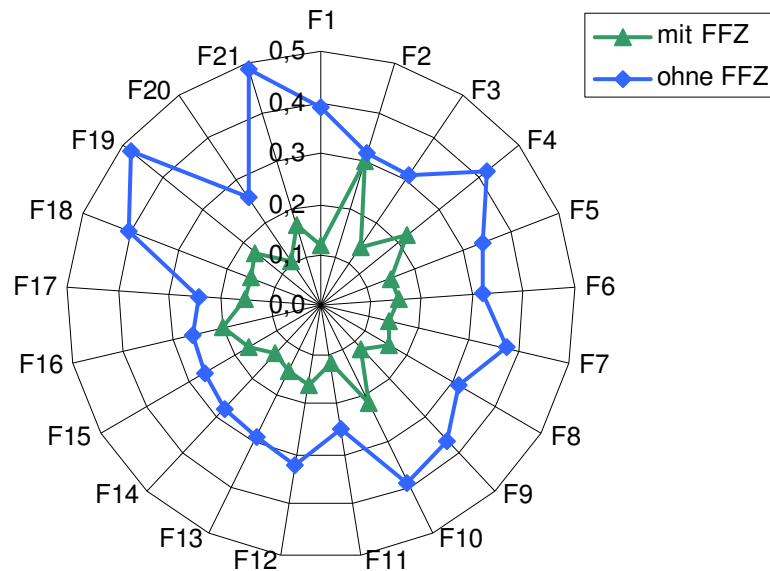


Abbildung 6-8: Standardabweichungen der normierten Spurabweichung bei der Fahrt mit und ohne Führungsfahrzeug (F1-F21: Nr. der Probanden)

Durch die Auswertung der Videosequenzen wird zudem deutlich, dass mit einem Führungsfahrzeug die gestellte tertiäre Bedienungsaufgabe zu einer erheblich geringeren Verschlechterung der Spurhaltung führen als wenn kein vorausfahrendes Fahrzeug sichtbar ist. Die Auswertung kann als Beleg für den Beitrag der Verkehrssimulation zur Güte der Querregelung gelten. Im Sinne der vorliegenden Arbeit soll damit der Nutzen der Verkehrssimulation nachgewiesen werden, auch wenn für die Anwendung selbst das Vorhandensein des Verkehrs nicht erforderlich ist. Die Verkehrssimulation sollte daher in die Spezifikation aufgenommen werden, wenn Untersuchungen zum Fahrerverhalten und zu sekundären und tertiären Aufgaben geplant sind. Vergleichswerte über die Spurhaltung im Simulator im Vergleich zur Realfahrt finden sich in [99].

6.7 Personenabhängige Variabilitäten

6.7.1 *Risikobewusstsein im Simulator*

Der in [207] beschriebene Begriff der „Nicht-Simulierbarkeit des existenziellen Engagements“ kann durch die Videoauswertung einer Versuchsreihe zu einem Notbremsystem untermauert werden. In der durchgeführten Versuchsreihe wurden verschiedene Folgefahrtsituationen bei guter Sicht und bei Nebel nachgestellt. Bei diesen Fahrten kommt es durch eine überraschende, starke Verzögerung des Vorausfahrenden ohne Fahrereingriff zu einem Auffahrunfall. In den insgesamt 60 simulierten Gefahrensituationen kam 30 Mal ein Auffahrunfall mit zum Teil erheblichen Differenzgeschwindigkeiten zu Stande.

Das Ziel dieser Versuchsreihe ist es, die Funktion des FAS-Prototyps in einer kritischen Situation zu demonstrieren und die Wahrnehmung der Warnsignale des FAS während der Unfallsituation zu beobachten. Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Realität bei entsprechender Versuchsführung diese Unfälle nicht oder nicht mit der gleichen Häufigkeit auftreten werden oder die dem Unfall vorausgehende kritische Fahrsituation gar nicht zu Stande kommt. Da nur die nachträgliche, bewusste Interpretation und Situationswahrnehmung ausgewertet wird, scheint es für diesen Untersuchungsgegenstand zulässig, wenn die Probanden ein nicht der Realität entsprechendes Risikobewusstsein zeigen.

Wenn die Reaktion des Probanden während der Unfallsituation ausgewertet werden soll, ist zum einen für eine gute Immersion des Probanden durch eine längere, ereignisarme Fahrt vorzusehen. Zum anderen muss berücksichtigt werden, dass die Probanden nach einer „Schrecksekunde“ Reaktionen zeigen, die offensichtlich nicht denen nach einem realen Unfall entsprechen (Lachen, Kopfschütteln, etc.).

Sobald sich die Probanden nach dem Unfall bewusst werden, in einem Fahrsimulator zu sitzen (ca. 1 s), sollten deren Reaktionen nicht mehr ausgewertet werden. Das Verhalten wird dann bewusst gesteuert und nicht mehr durch die für die Auslegung solcher FAS interessanten fertigkeitbasierten, unmittelbaren Reaktionen bestimmt.

6.7.2 *Nachlaufverhalten des Sattelauflegers*

Das Nachlaufverhalten des Sattelauflegers im Simulator wurde während der Inbetriebnahme des Simulators von verschiedenen Probanden als unrealistisch beurteilt [203]. Die Fahrer sagen beim Abbiegen an engen Kreuzungen übereinstimmend aus, dass der Auflieger einen erheblich geringeren Kurvenradius beschreibt als das Realfahrzeug. Als Folge wird beim Abbiegen häufig der Randstein mit dem Auflieger überrollt.

Aufgrund dieser Beanstandungen wird das Verhalten des simulierten Aufliegers mit einem validierten MKS-Simulationsmodell verglichen. Als Basis für den Vergleich wurden am Simulator die Position der Zugmaschine, der Lenkwinkel und der Knickwinkel aufgezeichnet. Als Ein-

gangsgröße für die MKS-Simulation werden Position und Orientierung der Zugmaschine verwendet und daraus der Knickwinkel zwischen Auflieger und Zugmaschine berechnet. Der Vergleich mit der MKS-Simulation ergibt schließlich eine weitgehende Übereinstimmung des Nachlaufverhaltens hinsichtlich des Knickwinkel, welcher die Position des Aufliegers bestimmt (Abbildung 6-9).

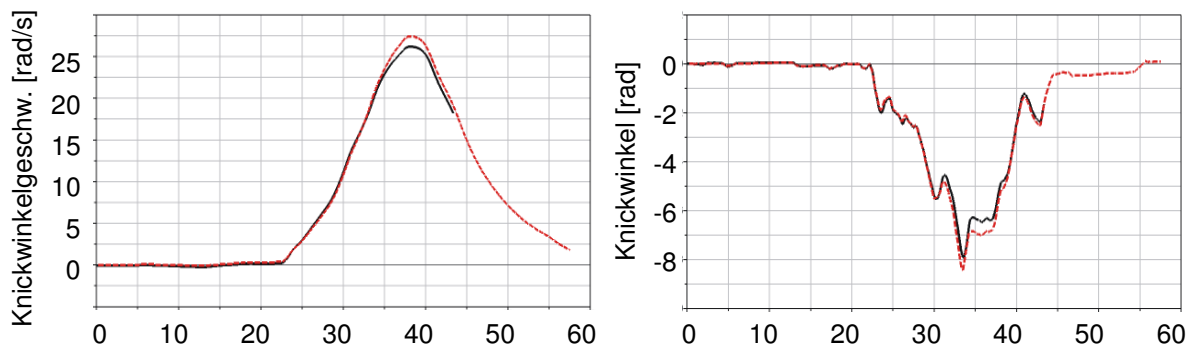


Abbildung 6-9: Vergleich zwischen FTM-Simulator und einem validierten MKS-Modell. Größen Knickwinkel und Knickwinkelgeschwindigkeit zw. Auflieger und Zugmaschine.

Fahrer, welche intensiv die Rückspiegelansichten während des Abbiegevorgangs nutzen, können den Fehler vermeiden. Es wird daher vermutet, dass der Fahrfehler auf das im Simulator weniger ausgeprägte Risikobewusstsein zurückzuführen ist. Das auf dem Bewegungssystem montierte Fahrerhaus-Mockup weist den Fahrer zudem nicht darauf hin, dass in der Simulation ein Auflieger vorhanden ist. Die ungewohnte Simulationsumgebung führt dann zusammen mit dem Bewusstsein, in einer Zugmaschine ohne Auflieger zu sitzen, zu dem beobachteten Fehlverhalten.

In der nachfolgenden Zusammenfassung wird der erreichte Stand der erarbeiteten Methode dargestellt und ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Detaillierungen gegeben. Zudem wird der Nutzen der Methode für den Fahrzeugentwickler beschrieben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

In der Arbeit wird eine Methode vorgestellt und validiert, die es dem Anwender aus der Fahrzeugtechnik ermöglicht, nachvollziehbar und mit einer hohen Aussagesicherheit einen für seine Belange geeigneten Fahrsimulator zu spezifizieren. Die entwickelte Methode bietet dem Nutzer die Möglichkeit, zielgerichtet Anforderungen an einen neuen Prüfstand abzuleiten, oder die Tauglichkeit eines bereits bestehenden Systems zu prüfen und Schwachstellen aufzudecken. Sie verlangt als Eingangsgrößen vom Nutzer die Sammlung und systematische Benennung der geplanten Anwendungen. Durch diese erste Abgrenzung des Anwendungsgebietes kann vermieden werden, dass aus Unsicherheit über die Anwendung stark überhöhte Anforderungen gestellt werden. Finanzielle und funktionale Risiken bei der Konzipierung können so minimiert werden.

Neben der Methode beinhaltet die Arbeit auch Informationen, die notwendig sind, um beurteilen zu können, welche Komponenten für den geplanten Einsatzzweck besonders wichtig sind. Auf dieser Basis können im Lauf der späteren Feinspezifikation leichter Entscheidungen getroffen werden, wenn, z.B. aus finanziellen Gründen, Kompromisse eingegangen werden müssen. Die konkrete Darstellung von Simulatorkonzepten für verschiedene Anwendungen ermöglicht eine Beurteilung, ob die Anlage bei einer späteren Erweiterung des Anwendungsspektrums sinnvoll aufgerüstet werden kann.

Es wird gezeigt, dass für die Untersuchung von primären, sekundären oder tertiären Aufgaben bei der Fahrt im Fahrzeug sehr unterschiedliche Konzepte und Ausprägungen von Simulatoren erforderlich sind. Während es bei der Untersuchung fahrdynamischer Vorgänge der Stabilisierungsebene (primäre Aufgabe) erforderlich ist, mit großem Hardware-Aufwand taugliche Bewegungssysteme zu realisieren, können tertiäre Nebenaufgaben auch an einfachsten Fahrsimulatoren untersucht werden. Es wird deutlich, dass es sogar kontraproduktiv für die Qualität der Versuchsergebnisse sein kann, wenn Themenstellungen untersucht werden, welche sensibel auf die Randbedingungen der Simulation reagieren. So ist es z.B. nicht sinnvoll, die Fehlerhäufigkeit bei Nebenaufgaben auf Simulatoren zu untersuchen, welche für Fahrdynamikuntersuchungen konzipiert wurden. Ein universell für alle Anwendungen einsetzbarer Simulator ist daher nicht sinnvoll zu realisieren, da ggf. widersprüchliche Konzeptmerkmale zu erfüllen sind.

Ausblick

Da die Kernaussagen der Methode auf der nicht veränderlichen Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen und seinen eingepägten Reiz-Reaktions-Mechanismen beruhen, ist sichergestellt,

dass der Ansatz unverändert bestehen bleiben kann. Aufgrund des breiten Spektrums der möglichen Anwendungen können jedoch die verwendeten Zusammenhänge im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht vollumfänglich bestätigt und im wünschenswerten Umfang detailliert werden. Dies gilt insbesondere für die Einflüsse der Simulatortechnik auf sekundäre und tertiäre Aufgabenstellungen, welche den Schwerpunkt der Untersuchungen am FTM-Simulator bilden.

Diese auf Elektronik und Information basierenden Fahrzeuginnovationen besitzen für die Fahrzeughersteller ein großes Wertschöpfungs- und Differenzierungspotenzial, welches nicht nur durch die Funktion, sondern vor allem durch die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle bestimmt wird. Ein großes Hindernis für den Anwendungstest solcher Systeme stellt die Verfügbarkeit der Technik in Form der erforderlichen Sensorik und Infrastruktur dar. Die virtuelle Entwicklungsumgebung der Fahrsimulationen eliminiert diese Problemstellung, da alle Informationen über die Fahrumgebung und den Verkehr konzeptbedingt schon vorhanden sind. In diesem wichtigen Entwicklungsgebiet überschneiden sich demnach die besonderen Fähigkeiten der Fahrsimulation und die Erfordernisse der Fahrzeugentwicklung. Der Fahrsimulator wird daher in Zukunft zwingender Bestandteil der Testumgebung zur Entwicklung von FAS sein.

Während die Simulatortechnik in den Bereichen Sichtsimulation, Geräuschsimulation, Datenbasis und Verkehr durch die fortschreitende Technik immer besser in der Lage ist, die Realität zu simulieren, werden durch die Bewegungssimulation nach wie vor große Verfälschungen in die Simulation eingebracht. Diese Entwicklung impliziert, dass der Qualitätsunterschied zwischen der Bewegungsdarstellung und der restlichen Simulation größer wird. Im Sinne einer homogenen Simulation, wie sie in Kapitel 3.2.6 gefordert wird, ist zu befürchten, dass bei der Untersuchung fahrdynamischer Aufgabenstellungen die Gefahr der Simulatorkrankheit ansteigen und somit die Akzeptanz der Gesamtsimulation beim Probanden sinken wird. Da für entsprechende Anwendungen besonders in Zusammenhang mit fahrdynamisch aktiven Regel- und Assistenzsystemen großes Potenzial besteht, aber eine Lösung für das Problem der Beschleunigungssimulation nicht abzusehen ist, sollte diese Verbesserung dieses Teilsystems der Simulation Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Allen, R. W., Rosenthal, T. J., Aponso, B. L.: A low cost PC platform for training and evaluating driver behavior, In: Proceedings of DSC 2002
- [2] Allen, R. W., Rosenthal, T. J., Aponso, B. L.: A Low Cost PC Based Driving Simulator for Prototyping and Hardware-In-The-Loop Applications, Special Publication 1361, SAE Paper No. 98-0222, 1998
- [3] Allen, S. F., Bruse, C.: Development of realistic microscopic terrain surfaces and features for driving simulation environments, In: Proceedings of DSC 2001
- [4] Arend, W., Kupke, P.: Anforderungen an Fahrsimulatoren zur Untersuchung des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens, sowie der verkehrstechnisch relevanten Eigenschaften von Straßentwürfen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, 1982
- [5] Ares, J., Brazalez, A., Busturia, J. M.: Tuning and Validation of the Motion Platform Washout Filter Parameters for a Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2001
- [6] Artz, B. E., Cathey, L. W., Grant, P.: The Design and Construction of the Visual Subsystem for VIRTTEX, the Driving Simulator at the Ford Research Laboratories, In: Proceedings of DSC 2001
- [7] Augsburg, K.: Methoden zur Untersuchung und Bewertung von Fahrer-Fahrzeug-Schnittstellen, dargestellt am Beispiel des Bremspedalgefühls, Seminar Fahrzeugtechnik TU Darmstadt, Darmstadt Januar 2003
- [8] Blackham, G.: Visual display systems for car and truck simulators, In: Proceedings of In: Proceedings of DSC 1999
- [9] Blana, E., Golias, J.: Behavioural validation of a fixed-base driving simulator, In: Proceedings of DSC 1999
- [10] Blommer, M., Greenberg, J.: Realistic 3D Sound Simulation in the VIRTTEX Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [11] Boer, E. R., Girshick, A. R., Yamamura, T.: Experiencing the Same Road Twice: A Driver Centered Comparison between Simulation and Reality, In: Proceedings of DSC 2000
- [12] Boer, E. R., Girshick, A. R., Yamamura, T.: Model Based Analysis of Drivers' Curve Negotiation Behavior: Comparing Simulation and Reality, In: Proceedings of DSC 2001
- [13] Boer, E. R., Kuge, N., Yamamura, T.: Affording Realistic Stopping Behavior: A

- Cardinal Challenge for Driving Simulators, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [14] Bortz, J.: Richtlinien zur Untersuchungsplanung und Versuchsleiterverhalten, Springer, Berlin, 2002
- [15] Bubb, H.: Ergonomie und Verkehrssicherheit, Konferenzbeiträge der GfA-Herbstkonferenz 2000, Utz Verlag, 2000
- [16] Bubb, H.: Haptik im Kraftfahrzeug, Kraftfahrzeugführung, Kapitel 10, Springer, Berlin, Heidelberg, New York u.a., 2001
- [17] Buld, S., Krüger, H. P.: Validierung Quer- und Längsführung, EMPHASIS Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen, Meilensteinbericht, Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften, Universität Würzburg, 2001
- [18] Erp, J. B. F. van, Veen, H.A.H.C. van: Vibro-Tactile Information Presentation in Automobiles, TNO Human Factors, Department of Skilled Behaviour, The Netherlands, Soesterberg, 2001
- [19] Champion, A., Heidet, A., Kemeny, A.: Traffic Generation with the SCANer II simulator : Towards a Multi-Agent Architecture, In: Proceedings of DSC 1999
- [20] Chatziastros, A., Wallis, G. M., Bühlhoff, H. H.: The Effect of Field of View and Surface Texture on Driver Steering Performance, Max-Planck-Institute for Biological Cybernetics, 1999
- [21] Chanton, O., Sauvage, J., Kassaagi, M.: Study of car loss of control : a comparison between an experiment on the dynamic simulator of Renault and a test track study, In: Proceedings of DSC 2002
- [22] Clark, B., Stewart, J.D.: Effects of Angular Acceleration on Man: Thresholds for the perception of Rotation and Translation Qculogyral Illusion, In: Aerospace Medicine 40, S. 952, 1969
- [23] Coates, N., Ehrette, M., Hayes, T.: Head-Mounted Display in Driving Simulation Applications in CARDS, In: Proceedings of DSC 002
- [24] Hering, K.: Situationsabhängiges Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr - Literaturübersicht und empirische Felduntersuchung, Universität zu Köln, 1999
- [25] Colinot, J.-P., Belay, Gildas: Multifunctional Sound Generator for the SHERPA Simulators of PSA Peugeot-Citroën, In: Proceedings of DSC 2000
- [26] Curry, R., Artz, B. E., Cathey, L. W.: Kennedy SSQ results: fixed- vs. motion-based Ford simulators, In: Proceedings of DSC 2002

-
- [27] Dagdelen, M., Reymond, G., Kearney, J.: Analysis of the visual compensation in the Renault driving simulator, In: Proceedings of DSC 2002
- [28] Donges, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug, Zeitschrift für Verkehrstechnik 24, S. 98-112, 1978
- [29] Drosdol, J., Panik, F.: The Daimler-Benz Driving Simulator: A Tool for Vehicle Development, SAE-Paper 850334, 1985
- [30] Human Centered Transportation Simulation Conference, Round Table Discussion: Simulator Validation, In: Proceedings of DSC North America, 2001
- [31] Duh, B.-L.: Use of an Independent Visual Background to Alleviate Simulator Sickness in the Virtual Environments that Employ Wide-Field Displays, University of Washington, 2001
- [32] Durth, W.: Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung, In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, S. 163, 1974
- [33] Espié, S., Saad, F.: Feasibility of the use of driven simulator for in-depth human driver behaviour studies, In: Proceedings of DSC 2000
- [34] Espié, S., Seddiki, E., Boulanger, V.: Driving simulator as a Tool for Road Signs Design and First Validation, In: Proceedings of DSC 2001
- [35] Espié, S., Mohellebi, H., Kheddar, A.: A High Performance / Low-Cost Mini Driving Simulator Alternative for Human Factors Studies, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [36] Fang, X., Pham, H. A., Tan, S.: Driving in the Virtual World, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [37] Frank, L. H., Casali, J. G.: Simulator Sickness: A Review of its Costs, Countermeasures and Prediction, SAE-Paper 861782, 1986
- [38] Freeman, J. S., Watson, G.: The Iowa Driving Simulator: An Implementation and Application Overview, SAE Paper 950174, 1994
- [39] Geiger, M.: Berührungslose Bedienung von Infotainment-Systemen im Fahrzeug, Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, 2003
- [40] Grant, P., Artz, B. E., Greenberg, J.: Motion Characteristics of the VIRTTEX Motion System, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [41] Greenberg, J., Artz, B. E., Cathey, L. W.: The Effect of Lateral Motion Cues Dur-

- ing Simulated Driving, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [42] Griffin, M.J.: Handbook of Human Vibrations, Academic Limited Press, London, 1996
- [43] Gruening, J., Bernard, J., Clover, C.: Driving Simulation, SAE-Paper 980223, 1998
- [44] Hebenstreit, B.v.: Grundzüge einer Verkehrspsychologie, J.A. Barth, München, 1961
- [45] Heidet, A., Warusfel, O., Vandernoot, G.: A Cost Effective Architecture for Realistic Sound Rendering in the SCANer II Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [46] Hoffman, R. B., Molino, J. A., Inman, V. W.: Driving Simulator Sickness Management at Turner-Fairbank Highway Research Center, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [47] Hogema, J. H.: Driving Behaviour in Approach Manoeuvres: A Simulator Study, TNO Human Factors, Report TM-00-D001, The Netherlands, Soesterberg, 2000
- [48] Hogema, J. H., Stel, I., Verschuren, R.M.A.F.: A model for the Steering System in the Driving Simulator, TNO Human Factor, TM 2000-M052, The Netherlands, Soesterberg, 2000
- [49] Hosman, R., Advani, S.: Integrated Motion Cueing Algorithm and Motion-Base Design for Vehicle Simulation, In: Proceedings of DSC 2001
- [50] Jamson, A. H.: Driving Simulator Validity : Issues of Field of View and Resolution, In: Proceedings of DSC 2000
- [51] Jamson, A. H., Smith, P.: How real does it feel? An "Emotional" Validation of the Leeds Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2002
- [52] Jamson, A. H.: Image Characteristics and their Effect on Driving Simulator Validity, Proceedings of the First International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, In: Training and Vehicle Design ,2001
- [53] Jamson, A. H., Smith, P.: Are You Used to it Yet? Braking Performance and Adaptation in a Fixed Base Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [54] Käding, W.: The advanced Daimler-Benz Driving Simulator, IPC-8 Technical Paper 9530012, Society of Automotive Engineers of Japan, 1995
- [55] Kallmann, M., Lemoine, P., Thalmann, D.: Immersive Vehicle Simulators for Prototyping, Training and Ergonomics, GROWTH program, Virtual Reality Systems for perceived quality testing of driving task and design, 2003

-
- [56] Kao, B. G., Artz, B. E.: Using Road Surface Measurements for Real Time Driving Simulation, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [57] Kappé, B., Korteling, J. E., Erp, J. B. F. van: Effects of Head Slaved and Peripheral Images on Display Efficiency, In: Proceedings of DSC 1999
- [58] Kaptein, N., Korteling, J. E.: The Effect of Image Resolution on Driving Simulator Validity, TNO Human Factors, Report TM-98-A048, Soesterberg, 1998
- [59] Kaussner, A., Grein, M., Krüger, H.-P.: An Architecture for Driving Simulator Databases with Generic and Dynamically Changing Road Networks, In: Proceedings of DSC 2001
- [60] Kaussner, A., Mark, C., Grein, M.: Fahrsimulator-Datenbasen mit dynamisch veränderbaren Straßennetzwerken, IZVW, Universität Würzburg, 2004
- [61] Kemeny, A.: Simulation and Perception of Movement, Research Division, Renault, Direction de la Recherche,
- [62] Klee, H., Radwan, E.: Assessment of the Use of a Driving Simulator for Traffic Engineering Studies, Final Report, University of Central Florida, 2004
- [63] Kolasinski, E. M.: Simulator Sickness in Virtual Environments, Virtual Reality - Simulator sickness, Technical Report 1027, 1995
- [64] König, R.: Dynamische Modellanpassung bei der Verkehrssimulation, Anforderungen und Auslegung einer dynamischen Verkehrssimulation, 1996
- [65] Krauss, M., Scheuchenpflug, R., Piechulla, W.: Measurement of presence in virtual environments, Bericht zum EU-Projekt ViRtual, Contract Nr. 1999-GRD-11030, 1999
- [66] Krebs, M.: Vehicle Modeling for High Dynamic Driving Simulator Applications, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [67] Kuge, N., Kubota, M., Itoh, K.: Study on Motion Algorithm Based on Driver Centered Approach, In: Proceedings of DSC 2002
- [68] Lee, W. S., Kim, J.-H., Cho, J.-H.: A Driving Simulator as a Virtual Reality Tool, Proceedings of IEEE, 1998
- [69] Lee, W. S., Kim, J.-H., Cho, J.-H.: Development of a Driving Simulator, SAE-Papers, 1997
- [70] Leonard, S. D.: Influence of Knowledge on Behaviour in Automobiles, In: Training and Vehicle Design, July 21-24, Proceedings of the 2nd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, 2003
- [71] Levine, O.H.: Effects of Visual Display Parameters on Driving Performance in a

- Virtual Environment Driving Simulator, Masterthesis, College of Engineering, Northeastern University Boston, MA, 1995
- [72] Manouselis, N., Karampiperis, P., Kosmatopoulous, E.: A Multi-Agent, Microscopic Traffic Simulation Architecture Incorporating Entites with Adaptive Behaviors, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [73] McLaughlin, S. B.: Measurement of Driver Preferences and Intervention Responses as Influenced by Adaptive Cruise Control Deceleration Characteristics, Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998
- [74] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Schwingungen, Band 2, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984
- [75] Molino, J. A., Liao, D., Williams, J. R.: Motion Cues for a 3-DOF Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [76] Mollenhauer, M. A.: A Simulator Sickness Literature Review, 2003
- [77] Nordmark, S., Palmkvist, G., Sehammar, H.: Recent and Future Improvements of the VTI Driving Simulator with special emphasis on the steering system and moving base, In: Proceedings of DSC 2001
- [78] Olson, A., Green, P.: A Description of the UMTRI Driving Simulator Architecture and Alternatives, Technical Report UMTRI-97-15, S. 97ff, 1997
- [79] Panerai, F., Droulez, J., Kelada, J. M.: Speed and Safety Distance Control in Truck Driving: Comparison of Simulation and Real-World Environment, In: Proceedings of DSC 2001
- [80] Reymond, G., Berthoz, A., Droulez, J.: Contribution of a Motion Platform to Kinesthetic Restitution in a Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 1999
- [81] Rabe, H.-J., Vogedes, J.: 3D Realtime Animation on Standard PC Platforms in HIL Simulators, In: Proceedings of DSC 2001
- [82] Rassl, R.: Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im PKW - Systemergonomische Analyse und Prognose, Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation, TU München, 2004
- [83] Reichart, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 22, Band 7, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001
- [84] Reymond, G., Heidet, A., Canry, M.: Validation of the Renault Dynamic Simulator and Application to ACC Studies, In: Proceedings of DSC 2000
- [85] Reymond, G., Heidet, A., Canry, M.: Validation of Renault's Dynamic Simulator for Adaptive Cruise Control Experiments, Renault Research Department, 1999
- [86] Richter, B.: Beitrag zum Problem der Beschleunigungssimulation in Fahrsimula-

- toren, Dissertation, TU Berlin, Fachbereich Verkehrswesen, 1981
- [87] Rill, G.: Fahrdynamik von Nutzfahrzeugen im Daimler-Benz Fahrsimulator, VDI-Berichte, Nr. 613, Daimler-Benz, Stuttgart, 1986
- [88] Rill, G.: Simulation von Kraftfahrzeugen, 1. Auflage, Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1994
- [89] Sabeur, M., Sommerfeld, T, Rommelfanger, R.: A New Software Tool for Generating Road Networks for Driving Simulation, In: Proceedings of DSC 2000
- [90] Sauvage, J., Chanton, O., Perron, T.: Study of Car Loss of Control on a Dynamic Simulator: Correlations Between Subjective Perceptions and Objective Parameters, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [91] Schill, V., Schmidt, M., Schmieder, H.: SFD - A structured method to select a Visual System for Simulators, In: Proceedings of DSC 2002
- [92] Schmidtke, H.: Ergonomie, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993
- [93] Schwarz, C., Gates, T., Papelis, Y. E.: Motion Characteristics of the National Advanced Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [94] Sheridan, T.B., Young, P.W., Ngo, D.: An Ultra-Low-Cost Moving-Base Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2001 North America
- [95] Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A.: Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks, In: Proceedings of DSC 2001
- [96] Suetomi, T., Horiguchi, A., Okamoto, Y.: The Driving Simulator with Large Amplitude Motion System, SAE-Paper 910113
- [97] Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A.: Influence of Steering Wheel Torque Feedback in a Dynamic Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2003 North America
- [98] Tomaske, W.: Einfluss der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren, Dissertation, Hochschule der Bundeswehr Hamburg; Dissertation Uni BW Hamburg, 1983
- [99] Wade, M. G., Hammond, C.: Simulation Validation, In: Proceedings of DSC 2000
- [100] Watson, G.: A Synthesis of Simulator Sickness Studies Conducted in a High-Fidelity Driving Simulator, In: Proceedings of DSC 2000
- [101] Weber, H.: Fahrsimulatoren in der verkehrspsychologischen Forschung, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Band 2, S. 90-98, 1972.
- [102] Weir, D. H., Clark, A. J.: A Survey of Mid-Level Driving Simulator, SAE-Paper

950172, 1995

- [103] Wright, S.: DRIVERSIM: A Probabilistic Approach To Realistic Traffic Generation, In: Proceedings of DSC 2000
- [104] Yao, Z., Mousseau, R., Kao, B. G.: A Powertrain Model for Real-Time Vehicle Simulation, In: Proceedings of DSC 2003 North America

Interne Quellen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

- [200] Steinhauer, V.: Konzipierung und Entwurf des Projektionsmoduls für einen stationären Lkw-Fahrsimulatorenaufbau, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, nicht veröffentlichtes Dokument
- [201] Humbert, D.: Auslegung und Optimierung des transversalen Schlittensystems für einen dynamischen PKW Fahrsimulator, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, nicht veröffentlichtes Dokument
- [202] Heißing, B.: Dynamik der Straßenfahrzeuge, Vorlesung, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
- [203] Rösle, W.: Versuch zur Bewertung der Eigenschaften des FTM-Fahrsimulators, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, nicht veröffentlichtes Dokument
- [204] Negele, H.J. Abschlussbericht Versuchsreihe „ACC Stop&Go“ am FTM Simulator, nicht veröffentlichtes Dokument
- [205] Negele, H.J. Abschlussbericht Versuchsreihe „Notbremsassistent“ am FTM Simulator, nicht veröffentlichtes Dokument
- [206] Gerlach, J.: Weiterentwicklung des Soundsystems am FTM Fahrsimulator, Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, nicht veröffentlichtes Dokument
- [207] Greiner, D.: Entwicklung eines LKW Fahrertrainings für Tanklastfahrzeuge am FTM Fahrsimulator, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, nicht veröffentlichtes Dokument

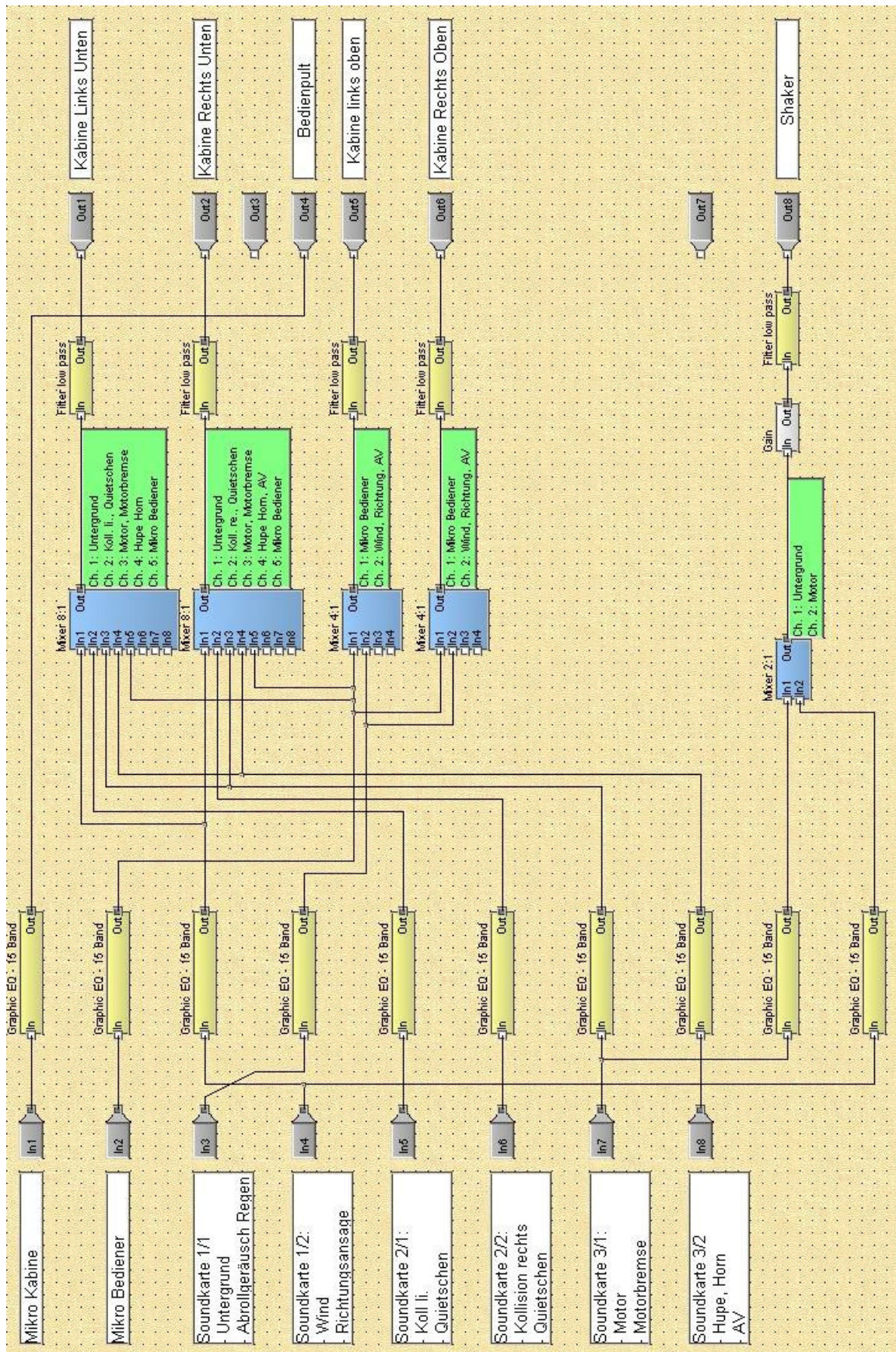
Internetquellen

- [210] Jorke, H. PDF-Download, INFITEC, Wellenlängenmultiplex Visualisierungssysteme (3.2.2006)
- [211] www.ea-games.com (15.9.2006)
- [212] www.ar-tracking.de (21.9.2006)
- [213] www.hccinema.de/laser (21.9.2006)

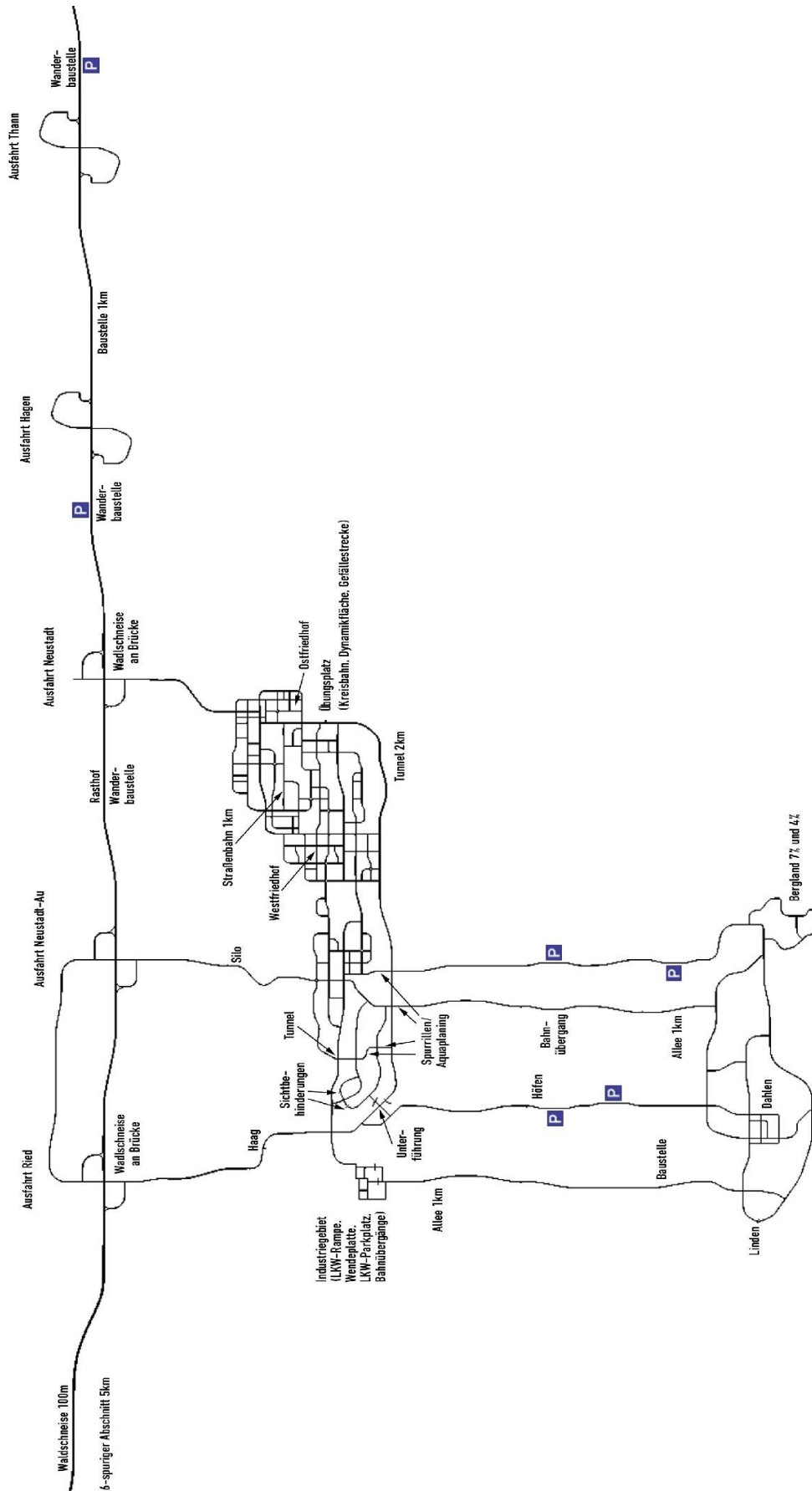
- [214] www.beamer-multivision.de (18.1.2006)
- [215] www.wikipedia.de (10.09.2006)

Anhang

Kanalbelegung der Geräuschsimulation des FTM Simulators



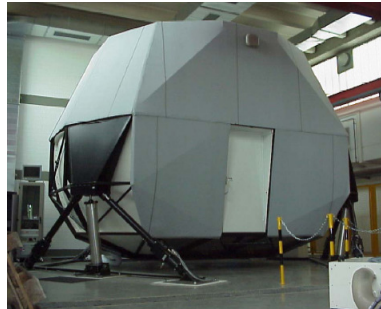
Übersichtskarte der Datenbasis des FTM Fahrtrainers



Ausführungen von Bewegungssystemen mit 3 bis 10 Freiheitsgraden



3 Freiheitsgrade
 • xy-rotatorisch: Neigeelemente
 • z-translatorisch: Hubelement
 • ungerichtete Vibrationselemente
 Dr.-Ing. Reiner Foerst GmbH



6 Freiheitsgrade Standard-BWS
 • xyz-translatorisch
 • xyz-rotatorisch
 Transport Research Laboratory,
 TruckSim, Crowthorne, UK



6 Freiheitsgrade Standard-BWS:
 • xyz-translatorisch
 • xyz-rotatorisch
 Universität Würzburg, Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften



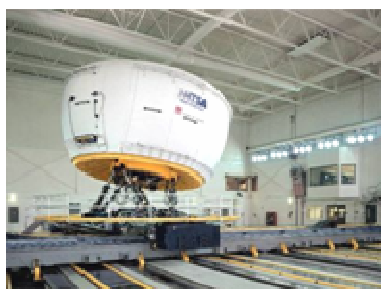
6 Freiheitsgrade, Standard-BWS
 • xyz-translatorisch
 • xyz-rotatorisch
 Ford, Safety and Research Development Department



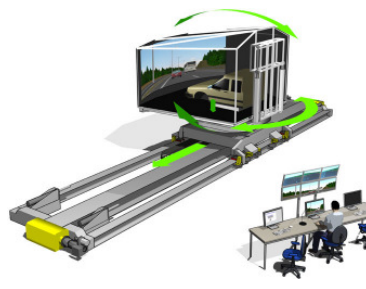
4 Freiheitsgrade
 • xy-rotatorisch: Neigeeinrichtung
 • z-rotatorisch: Drehtisch
 • z-translatorisch: Hubeinrichtung
 Universidad de Zaragoza



6 Freiheitsgrade Standard-BWS
 • xyz-translatorisch
 • xyz-rotatorisch
 Kookmin University, Mechanical and Automotive Engineering



10 Freiheitsgrade
 • Standard-BWS
 • xy-transl.: Schienen
 • z-rotatorisch: Drehtisch
 • z-transl: Vibrationselemente
 University of Iowa



5 Freiheitsgrade:
 • xy-rotatorisch: Neigeeinrichtung
 • x oder y-translatorisch: Schiene
 • z-rotatorisch: Drehtisch
 • z-translatorisch: Vibrationsplatte
 Swedish National Road and Transport Research Institute



2 ½ Freiheitsgrade:
 • Rampen-BWS: BWS liefert kombinierte Rotation um die y-Achse bei Translation in x-Richtung und umgekehrt
 • ungerichtete Vibrationselemente
 STN Atlas Elektronik GmbH