

Institutsbericht

IB 111-2014/44

Erste Bewertungsanalyse des Robotic Motion Simulators

Dipl.-Ing. Carsten Seehof

Institut für Flugsystemtechnik (DLR FT)
Braunschweig

55	Seiten
21	Abbildungen
3	Tabellen
12	Literaturstellen

Stufe der Zugänglichkeit: I, intern und extern zugänglich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abt. Flugdynamik und Simulation
Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

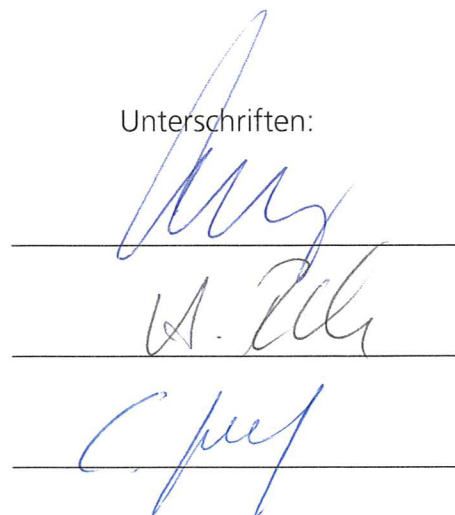
Braunschweig, 24.11.2014

Unterschriften:

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag

Abteilungsleiter: Dr.-Ing. H. Duda

Verfasser: Dipl.-Ing. C. Seehof



Änderungsverfolgung

Version	Datum	geänderte Seiten/Kapitel	Bearbeiter
1.0	24.11.2014	Ersterstellung	C. Seehof

Inhaltsverzeichnis

Änderungsverfolgung	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Dokumentenverwaltung	5
1.1 Zweck des Dokuments.....	5
1.2 Danksagung.....	5
1.3 Gültigkeit des Dokumentes.....	5
1.4 Begriffsbestimmungen.....	5
1.5 Abkürzungen	5
1.6 Zusammenhang mit anderen Dokumenten.....	6
2 Einleitung.....	7
2.1 Einbindung in das Gesamtprojekt.....	7
2.2 Übersicht	7
3 Allgemeines Vorgehen.....	9
3.1 Bewertung von Flugsimulatoren.....	9
3.2 Anforderungserfassung und Bewertung von Flugsimulatoren gem. ICAO 9625	10
3.2.1 Fidelity Level.....	10
3.2.2 Anforderungserfassung und Nachweis der Umsetzung	11
3.3 Anforderungserfassung und Bewertung von Fahrsimulatoren.....	14
3.3.1 Definition des Forschungsziels.....	16
3.3.2 Spezifikation der Testfälle	16
3.3.3 Vorauswahl der Fahrsimulatoren und Definition der Anforderungen	16
3.3.4 Prüfung der Einhaltung der Anforderungen.....	16
3.3.5 Festlegung der Testverfahren	17
3.3.6 Durchfahren des Testkataloges	17
4 Anforderungskatalog an Fahrsimulatoren.....	18
4.1 Bewegungssystem (MOT).....	18
4.2 Motion Cueing (MC)	19
4.3 Control Loading (HAP).....	19
4.4 Cockpit (CP).....	20
4.5 Außensicht (VIS)	20

4.6	Simulation (SIM).....	22
4.7	Geräuschsimulation (AUD).....	23
4.8	Dynamik (DYN).....	24
4.9	Verschiedenes (MISC).....	25
5	Aufstellen des Testkataloges.....	27
5.1	Doppeltes Spurwechselmanöver.....	27
5.1.1	Allgemeine Beschreibung.....	27
5.1.2	Analyse des Experiments.....	27
5.1.3	Anforderungen an den Fahrsimulator.....	32
5.2	Test Nr. UC 01 401: Vermeidung von Auffahrunfällen infolge von Geschwindigkeitsunterschieden.....	33
5.2.1	Anforderungen an den Fahrsimulator.....	33
6	Erste Bewertungsanalyse RMS.....	35
6.1	Doppeltes Spurwechselmanöver.....	35
6.1.1	Allgemeine Bewertung.....	35
6.2	Test Nr. UC 01 401: Vermeidung von Auffahrunfällen infolge von Geschwindigkeitsunterschieden.....	37
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	39
8	Anhang.....	40
8.1	Literatur.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9	Literaturverzeichnis.....	40
9.1	Anforderungen durch den Versuch „Doppelter Spurwechsel“.....	41
9.2	Bewertung der Systemeigenschaften RMS.....	43
9.2.1	Bewertung „Doppelter Spurwechsel“.....	43
9.2.2	Bewertung „Abstandsassistent“.....	45
9.3	Testbeschreibung UC 01 401: Vermeidung von Auffahrunfällen infolge von Geschwindigkeitsunterschieden.....	47

1 Dokumentenverwaltung

1.1 Zweck des Dokuments

Im Rahmen des Projektes „Fahrzeugintelligenz und Mechatronisches Fahrwerk – FiF“ wird im Zuge des Teilprojektes 4000 „Mechatronisches Fahrwerk und Modellbasierte Entwicklungsprozesse“ die „Objektive Bewertung von Bewegungssimulatoren“ als Arbeitspaket 4600 vorangetrieben. Das vorliegende Dokument beinhaltet den laut Projektplan zu erstellenden Bericht über die erste Bewertungsanalyse des Robotic Motion Simulators für den Einsatz als Versuchsmittel innerhalb des Projektes. Mit Freigabe dieses Dokumentes ist der Meilenstein 2 im AP4600 vollständig bearbeitet.

1.2 Danksagung

Ein Herzlicher Dank für die ebenso professionelle wie kollegiale Mitarbeit geht an die projektbeteiligten DLR-Mitarbeiter des Instituts für Systemdynamik und Regelungstechnik aus Oberpfaffenhofen und des Instituts für Verkehrssystemtechnik aus Braunschweig, ohne deren tatkräftige Unterstützung das vorliegende Dokument nicht entstanden wäre. Besonderer Dank geht hierbei an die Kollegen Dr.-Ing. T. Bellmann und Dipl.-Ing. A. Labusch für die Erarbeitung der Testbeschreibung des doppelten Spurwechselmanövers (Kapitel 5.1) sowie die Durchführung und Dokumentation der Bewertung des Robotic Motion Simulators für dieses und die weiteren Manöver (Kapitel 6). Ebenso großer Dank geht an Dr.-Ing. M. Fischer für die Erarbeitung der Bewertungssystematik (Kapitel 4), deren visueller Aufarbeitung sowie der Erarbeitung der Testbeschreibung des Bremsmanövers (Kapitel 5.2).

1.3 Gültigkeit des Dokumentes

Dieses Dokument bleibt bis zu einer Neuauflage auf unbestimmte Zeit gültig.

1.4 Begriffsbestimmungen

keine

1.5 Abkürzungen

A/C	Aircraft
AP	Arbeitspaket
ATC	Air Traffic Control
ATPL	Airline Transport Pilot Licence
CPL	Commercial Pilot Licence
CQ	Continuing Qualification
CR	Class Rating
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DFS	Dynamischer Fahrsimulator
FAA	Federal Aviation Authority

FSTD	Flight Simulation Training Device
FT	Institut für Flugsystemtechnik
G	Generic
ICAO	International Civil Aviation Organization
IO	Initial Operator Training and Checking
MPL	Multi Crew Pilot Licence
N	None
PPL	Private Pilot Licence
R	Representative
Re	Take Off and Landing Recency Training
RL	Recurrent Licence Training and Checking
RMS	Robotic Motion Simulator
RL	Recurrent Licence Training and Checking
RO	Recurrent Operator Training and Checking
S	Specific
SOC	Statement of Compliance
SR	Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik
T	Train(ing)
TP	Teilprojekt (FiF)
TP	Training to Proficiency (ICAO 9625)
TR	Type Rating
TS	Institut für Verkehrssystemtechnik

1.6 Zusammenhang mit anderen Dokumenten

keine

2 Einleitung

2.1 Einbindung in das Gesamtprojekt

Dem Institut für Flugsystemtechnik im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. wurde innerhalb des Projektes „Fahrzeugintelligenz und Fahrwerk für sichere und effiziente Mobilität für den urbanen Raum“ die Verantwortung für die Bearbeitung des Arbeitspaketes AP4600 „Objektive Bewertung von Bewegungssimulatoren“ übertragen. Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Aufstellung und Validierung objektiver Messgrößen für die Simulation von Bewegungszuständen in Fahrzeugen. Dies erfolgt vor dem Hintergrund der nach wie vor ausschließlich auf subjektiven Beurteilungen beruhenden Bewertungsmethoden. Diese sind naturgemäß stark abhängig von den Wahrnehmungsschwellen, der Konstitution und den Prägungen der bewertenden Person. Diese Eigenschaften sind wiederum abhängig vom Zeitpunkt der Durchführung der Bewertung sowie der vorausgehenden Belastung des Probanden. Diese Randbedingungen führen immer wieder zu einer Diskussion bezüglich des Einflusses der Bewegungssimulation auf die Simulationsgüte und den Nutzen der Bewegungssimulation für die Erreichung eines Trainingsziels. In dieser Diskussion spielt nicht zuletzt der Anteil der Bewegungssimulation an den Kosten für die Fahrzeugsimulation eine große Rolle.

Unbestritten ist dagegen, dass in der realen Welt die Wahrnehmung von Bewegung bei der Beurteilung eines Fahrzeugzustandes einen entscheidenden Einfluss hat. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die als Immersion bezeichnete Wahrnehmung der eigenen Person in der virtuellen Welt durch die Simulation von Bewegungsvorgängen stark beeinflusst wird. Somit ist das Verständnis für den Zusammenhang zwischen der Qualität der Bewegungs- und der Gesamtsimulation von herausragender Bedeutung.

Ziel des Arbeitspaketes ist das Aufstellen von objektiven Messgrößen für die Bewertung von Fahrsimulationen. Hierfür ist neben dem Wissen um die technischen Eigenschaften der Anlagen das Verständnis für die Perzeption von Beschleunigungseindrücken durch den Menschen notwendig. Übergeordnet wird damit das Wissen um den Einfluss der Bewegungssimulation auf die Simulationsgüte der Fahrzeugsimulation erweitert. In Zukunft könnte damit die eine Seite des postulierten Zusammenhangs zwischen Simulationsgüte und Trainingseffektivität beschrieben werden.

2.2 Übersicht

Anders als in der Flugsimulation ist die Definition der Anforderungen an einen Fahrsimulator seitens der Gesetzgebung nicht verbindlich spezifiziert. Der Hauptgrund hierfür liegt in den grundsätzlich unterschiedlichen Einsatzgebieten. Während Flugsimulatoren in der überwiegenden Anzahl für Trainingszwecke verwendet werden, kommen Fahrsimulatoren bislang hauptsächlich in der Entwicklung zum Einsatz. In der Folge fehlen allgemein anerkannte Verfahren für die Konzeption, die Entwicklung und den Betrieb solcher Systeme. Dieser Bericht skizziert deshalb das auf die Anforderungen des laufenden Projektes angepasste Vorgehen. Er soll die Erfahrungen der Betreiber von Simulatoren im DLR aus den Bereichen Verkehr und Luftfahrt in einem gemeinsamen Ansatz bündeln. Dieser ist Ausgangspunkt für das weitere Vorgehen zur Erarbeitung des AP Ziels der optimierten Ansteuerung der Bewegungssysteme für alle Fahrsimulatoren des DLR.

Der Bericht umfasst das in einem Workshop am 06. März 2014 in Braunschweig zwischen den AP-Beteiligten vereinbarte Vorgehen sowie die in einem ersten Umsetzungsschritt durchgeführten Arbeiten. Er beinhaltet

- das allgemeine Vorgehen,
- die erste Aufstellung von Bewertungskriterien für Fahrsimulatoren,
- eine erste Abschätzung der für die Testfälle geforderten Anforderungen an die Simulatoren sowie
- einen Vergleich der letzten beiden Punkte für den RMS.

In einem abschließenden Ausblick wird das Vorgehen zur daraus folgenden Bearbeitung des AP Meilenstein 3 „Messung des aktuellen Bewegungsverhaltens des dynamischen Fahrsimulators und des Robotic Motion Simulators“ beschrieben.

3 Allgemeines Vorgehen

Das folgende Kapitel stellt die Ursachen für die unterschiedlichen Herangehensweisen zur Aufstellung von Anforderungen für Flug- und Fahr simulatoren dar. Das in der Luftfahrt gängige Vorgehen für die Bewertung von Flugsimulatoren wird beschrieben. Eine Übertragung dieser Vorgehensweise auf Fahr simulatoren wird vorgestellt.

3.1 Bewertung von Flugsimulatoren

Der Einsatz von Fahrzeugsimulatoren ist im Vergleich mit dem Einsatz von Flugsimulatoren neu und umfasst bislang andere Einsatzgebiete. Während in der Flugsimulation die Ausbildung von Flugpersonal bei der weitaus überwiegenden Anzahl der eingesetzten Simulatoren im Vordergrund steht, werden Fahrzeugsimulatoren bislang hauptsächlich für die Entwicklung von Fahrzeugen und deren Komponenten eingesetzt. Der Hauptgrund für diese Unterschiede liegt in den extremen Unterschieden der Kostenverhältnisse der Flug-/Fahrstunden im Simulator zu denen im (Luft-)Fahrzeug. Dies hatte gravierende Folgen für die Entwicklung von Anforderungen an die Geräte.

In der Flugsimulation machte der Einsatz von Flugsimulatoren als Ausbildungsgerät eine umfassende Regulierung notwendig um ein definiertes Ausbildungsniveau zu gewährleisten und den Luftfahrtbetrieben mit Hilfe eines darauf aufbauenden Zertifizierungswesens den Nachweis der Einhaltung der gesetzlichen Standards bei der Aus- und Weiterbildung von Piloten zu ermöglichen. Die Einführung von Flugsimulatoren in den täglichen Betrieb verlief weitgehend reibungslos. Schon mit den ersten Flugsimulatoren wurde sowohl der wirtschaftliche wie auch der sicherheitstechnische Gewinn als gegeben angesehen. Die Entwicklung gesetzlicher Vorgaben wird aus dieser Sichtweise heraus seitens der Nutzer begrüßt und unterstützt. Erst unter dem Kostendruck, der sich durch die Etablierung von Billigfluglinien veränderten Luftfahrtmärkte, werden auch die Kosten von Simulationstraining stärker hinterfragt und in der Folge gesenkt. Insbesondere die Bewegungssimulation stand hier auf Grund ihrer hohen Folgekosten für aufwändigere Gebäude, Infrastruktur und Festigkeitsanforderungen im Fokus.

Darüber hinaus wurden die Anforderungen und Nachweisverfahren für Flugsimulatoren kontinuierlich weiterentwickelt. Deren Leistungsfähigkeit wird dabei mittels objektiver und subjektiver Tests nachgewiesen. Die objektiven Tests sollen die Systemreaktion auf verschiedene Steuereingaben oder Testsignale ermitteln und mit denen des simulierten Flugzeuges vergleichen. Im Vordergrund stehen hierbei für den Einsatzzweck typische Manöver. Die Simulationsqualität wurde in der Folge durch die Bewertung der Abweichungen für jeden Test definierter Toleranzen ermittelt. Der Vorteil dieser Tests liegt in der klaren und nachvollziehbaren Bewertungsmethodik. Der Nachteil liegt in der Beschränkung auf technisch beschreib- und messbare Größen. Andere Einflussgrößen auf die Simulationsqualität wie beispielsweise die ergonomischen Zusammenhänge im Cockpit, die Farbwahl und Beschaffenheit von Oberflächen oder das Zeitverhalten elektronischer Anzeigen sind sehr schwer zu beschreiben und zu erfassen, haben jedoch großen Einfluss. Aus diesem Grund werden die objektiven Tests durch subjektive Tests ergänzt. Mittels dieser sollen die objektiv nur sehr aufwändig erfassbaren Parameter durch die Beurteilung von Piloten ergänzt werden.

Die Durchführung subjektiver Tests stößt jedoch an mehreren Stellen an Grenzen. Limitierend sind hierbei wesentlich die unzureichenden Fähigkeiten des Menschen, Sinneseindrücke

- generell quantitativ
- mit zeitlichem Abstand in Relation zueinander und
- unabhängig vom Vorgeschehen

zu erfassen, zu bewerten und zu beschreiben. Dies macht die Nutzung von Ergebnissen subjektiver Tests mitunter schwierig.

Die gewonnenen Bewertungen führen zusammen mit der Ausstattung des Simulators zu einer Einstufung des Simulators (Certification Level). Abhängig von dieser Einteilung können bestimmte Trainingsinhalte durchgeführt und vorgeschriebene Flugzeiten angerechnet werden (Credits). Die Einteilung erfolgt zunächst noch nach diversen (multi-)nationalen Kriterien. Der Vorteil liegt in der vergleichsweise einfachen Einordnung. Diese macht es dem Nutzer leicht möglich, für einen bestimmten Trainingsinhalt den passenden Simulator zu finden. Auf der anderen Seite werden in vielen Fällen Simulatorfähigkeiten vorgehalten, welche für den konkreten Trainingszweck nicht notwendig sind. Ein Mehraufwand ist die Folge.

3.2 Anforderungserfassung und Bewertung von Flugsimulatoren gem. ICAO 9625

3.2.1 Fidelity Level

Dem stellt das im Oktober 2009 veröffentlichte Dokument ICAO 9625, Rev. 3 ein weiterentwickeltes Konzept gegenüber. Der Grundgedanke dieses Standards liegt in der Möglichkeit, Flugsimulatoren für gezielte Trainingsmaßnahmen zu konfektionieren. Dabei werden bis auf die Ebene der zu trainierenden Flugmanöver die geforderten Fähigkeiten festgelegt und deren Bewertung definiert. Diese dienen entweder der Ausbildung („Training“) oder der Aufrechterhaltung/Erlangung eines Übungsstandes („Training to Proficiency“).

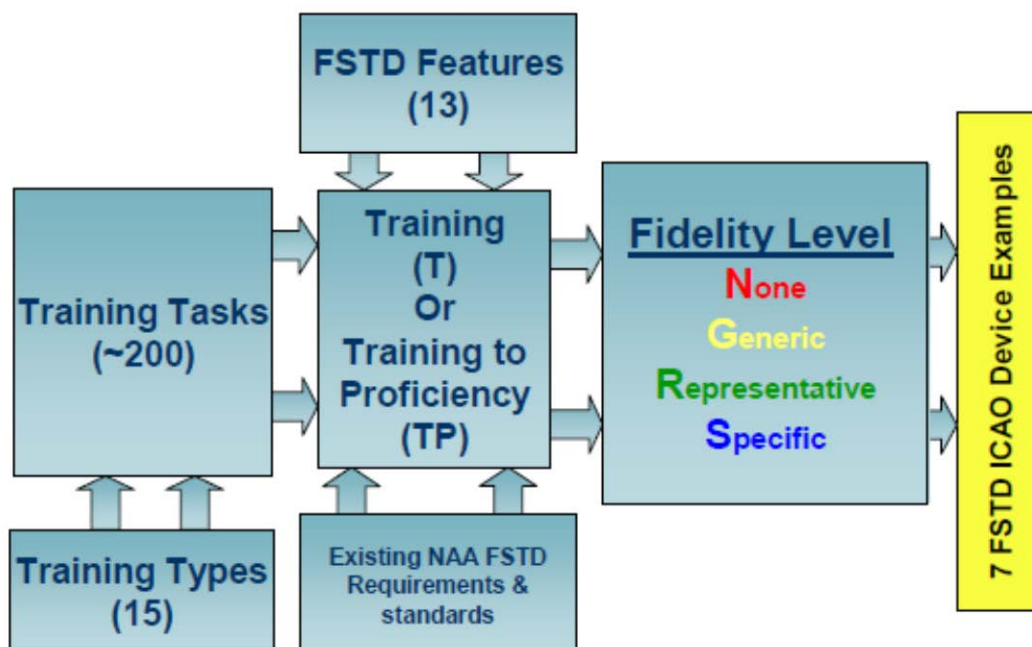


Abb. 1: Prozess der Trainingsanalyse gem. [1]

Unabhängig von den Betreibern oder Nutzern fließen hier übergeordnete Anforderungen auf Grund (multi-)nationaler Vorschriften ein, welche die Ausstattung von Flugsimulatoren für die Durchführung von definierten Trainingsinhalten festlegen.

Das Einsatzspektrum des Flugsimulators wird durch die Ausstattung und die vorgesehenen Trainingsinhalte festgelegt. Im Gegensatz zu anderen Vorgaben werden durch ICAO9625 zunächst keine Einschränkungen vorgenommen. Dies macht dem Betreiber eine auf die Bedürfnisse der Nutzer abgestimmte Ausstattung möglich. Die Folge dieser Festlegung auf Trainingsinhalte sind Anforderungen an die zuvor gewählte Ausstattung (Fidelity Level) in Bezug auf den Grad von Realitätsnähe der einzelnen Komponenten. Auf dieser Grundlage erfolgt eine Einteilung in sieben Klassen von Ausbildungsgeräten.

<u>Level</u>	<u>Aircraft simulation</u>	<u>Cueing simulation</u>	<u>Environment simulation</u>
None	Not required.	Not required.	Not required.
Generic	Not specific to aeroplane model, type or variant.	Generic to an aeroplane of its class. Simple modelling of key basic cueing features. For <i>visual cueing only</i> : Generic visual environment with perspective sufficient to support basic instrument flying and transition to visual from straight in instrument approaches.	Simple modelling of key basic environment features.
Representative	Representative of an aeroplane of its class, e.g. four engine turbo-fan aeroplane. It does not have to be type specific.	For <i>sound and motion cueing only</i> : Replicates the specific aeroplane to the maximum extent possible. However physical limitations currently only provide representative, not specific, cues. For <i>visual cueing only</i> : Representative of the real world visual environment and perspective.	Representative of the real world environment.
Specific	Replicates the specific aeroplane.	Applicable to <i>visual cueing only</i> : replicates the real world visual environment and (infinity) perspective.	Replicates the real world environment as far as possible for any specific location.

Abb. 2: Definition der Ausstattungsmerkmale gem. [1]

3.2.2 Anforderungserfassung und Nachweis der Umsetzung

Zur Umsetzung dieser Ziele wird durch [1] das folgend dargestellte, strukturierte Vorgehen vorgeschlagen. Der Standard kann sowohl als Leitfaden zur Aufstellung von Anforderungen für einen neuen Flugsimulator als auch zur Beurteilung der Eignung sowie für behördliche

Abnahmeverfahren genutzt werden. Im Folgenden wird projektbezogen nur die Beurteilung eines Simulators für einen gegebenen Anwendungsfall beschrieben.

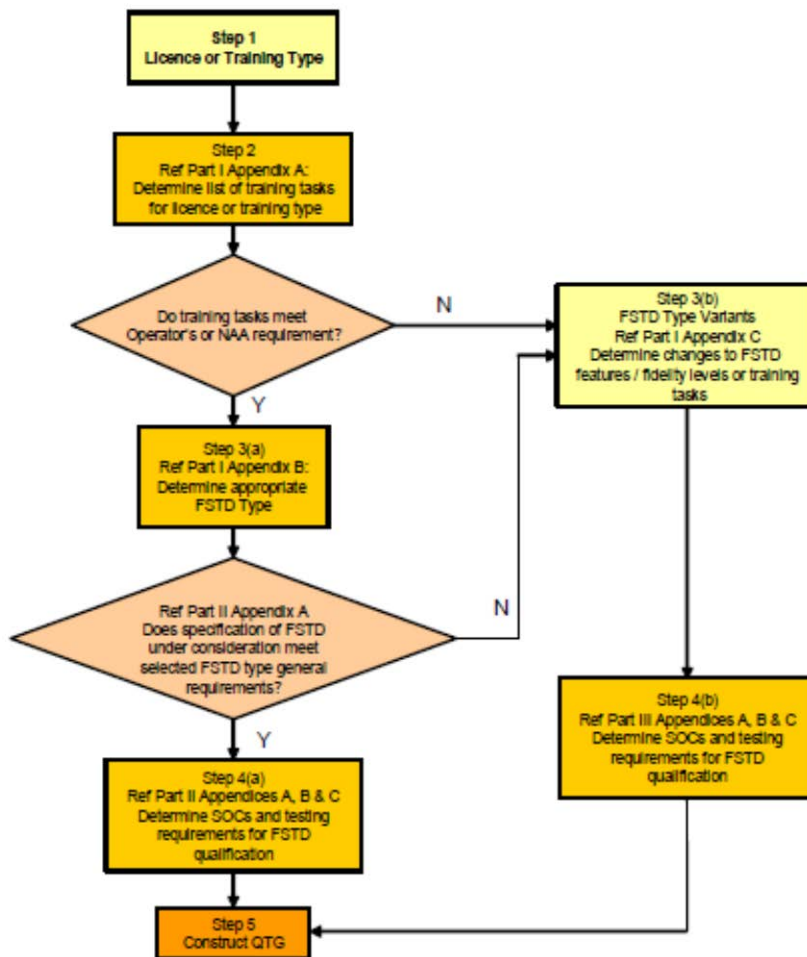


Abb. 3: Prozessablauf der QTG Spezifikation gem. [1]

Die ersten Schritte sind hierbei stark luftfahrtspezifisch und sollen deshalb lediglich in aller Kürze beschrieben werden. Zunächst wird der generelle Einsatzzweck des Flugsimulators festgelegt. Dies umfasst sowohl die traditionellen Ausbildungswege von der Privatpilotenlizenz über Instrumentenflugberechtigung und Berufspilotenlizenz bis zur allgemeinen Erlaubnis zum weltweiten, gewerbsmäßigen Transport von Personen und Gütern als auch die vergleichsweise neuen Lizenzierungswege der Multi-Crew-Pilot-Licence. Der Hauptunterschied zu den bisherigen Ausbildungsmodellen liegt in der konsequenten Vorbereitung der angehenden Piloten auf das Führen von Flugzeugen mit mehrköpfiger Besatzung. Im Flugbetrieb bedeutet dies eine frühere Einsatzbereitschaft z. B. als erster Offizier wogegen nach dem bisherigen Modell zunächst die vollumfängliche Ausbildung stand, welche dann im Regelflugbetrieb zunächst so nicht genutzt wurde. Zu diesen beiden wesentlichen Alternativen kommen noch Unterschiede der nationalen Luftfahrtgesetzgebung in Bezug auf die Lizenzierung hinzu.

Auf der Grundlage des definierten Einsatzspektrums werden in einem zweiten Schritt die erforderlichen Trainingsinhalte festgelegt. Auch diese lehnen sich an die nationalen Forderungen an. Es folgt die Prüfung auf vollständige Einhaltung der Anforderungen des Betreibers und/oder

des Gesetzgebers. An dieser Stelle wird die durch ICAO9625 ermöglichte Flexibilität deutlich. Der Betreiber hat sowohl die Möglichkeit die seitens des Gesetzgebers vorgegebenen Ausbildungs- und Qualifikationsstufen pauschal anzuwenden als auch auf seine Bedürfnisse maßgeschneiderte Ausbildungskonzepte zu Grunde zu legen.

Im ersten Fall ergeben sich aus den gewählten Ausbildungsinhalten gemäß der anhängenden Tabelle direkt die Anforderungen an die Qualität des Flugsimulators.

Licence or type of training	ICAO FSTD	T/TP	Cockpit Layout and Structure	Flight model (Aero and engine)	Ground Handling	A/C Systems	Flight controls and forces	Sound Cue	Visual Cue	Motion Cue	Environment - ATC	Environment - Navigation	Environment - Weather	Environment - Aerodromes and Terrain
MPL4 - Advanced	VII	T+TP	S	S	S	S	S	R	S	R	S	S	R	R
TR / ATPL		TP	S	S	S	S	S	R	S	R	S	S	R	R
Re		T	S	S	S	S	S	R	S	R	N	S	R	R
RL / RO / IO / CQ		TP	S	S	S	S	S	R	S	R	S	S	R	R
MPL3 - Intermediate	VI	T+TP	R	R	R	R	R	R	S	R1	S	S	R	R
TR / ATPL / RL / RO / IO	V	T	S	S	S	S	S	R	R	N	G	S	R	R
MPL2- Basic	IV	T+TP	R	G	G	R	G	R	G	N	G	S	G	R
CR	III	T	R	R	R	R	R	G	R	N	N	S	G	G
IR	II	T	G	G	G	R	G	G	G	N	G	S	G	G
MPL1 - Core flying skills	I	CPL	T	R	R	R	R	G	R	N	N	S	G	G(S)
		T	R	R	R	R	R1	G	G	N	N	S	G	G
PPL		T	R	R	R	R	R	G	R	N	N	S	G	R(S)

Abb. 4: Anforderungserfassung für einen Flugsimulator auf Grundlage der Ausbildungsziele gem. [1]

Alternativ dazu können bei proprietär definierten Trainingsinhalten die Differenzen zwischen den notwendigen und den durch den Simulator erfüllten Anforderungen festgestellt werden. Sollten Differenzen bestehen, folgt hieraus entweder die Notwendigkeit zur Nachrüstung oder die nicht gegebene Eignung des Flugsimulators. Auch für die Festlegung der Differenzen stellt ICAO 9625 eine auf die Trainingsinhalte zugeschnittene Anforderungsmatrix zur Verfügung.

		PPL (T)											
Source	Competency Element or Training Task	Cockpit Layout and Structure	Flight model (Aero and engine)	Ground Handling	A/C Systems	Flight controls and forces	Sound Cue	Visual Cue	Motion Cue	Environment – ATC	Environment – Navigation	Environment – Weather	Environment – Aerodromes and Terrain
FAA	8.1.2.1 Recognition/recovery from, approach to stall: Clean configuration	R	R	N	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	8.1.2.2 Recognition/recovery from, approach to stall: Take-off and manoeuvring configuration	R	R	N	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	8.1.2.3 Recognition/recovery from, approach to stall: Landing configuration	R	R	N	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	8.6 Slow flight.	R	R	N	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	8.15 Spin awareness.	R	R	N	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	10.1 All engines operating (normal).	R	R	N	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	12.1 All engines operating.	R	R	R	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	12.2 Crosswind.	R	R	R	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	12.4.3 Landing Transition: From a visual approach.	R	R	R	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	12.5 Rejected landing.	R	R	R	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	12.6 Zero or partial flaps.	R	R	R	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	12.10 Landing from a short-field approach.	R	R	R	R	R	G	R	N	N	N	G	G
FAA	13.1 Un-annunciated.	R	R	R	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	14.1 Fire / smoke in aircraft.	R	R	R	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	14.2 Un-annunciated fire in flight.	R	R	G	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	14.4 Emergency descent (maximum rate).	R	R	G	R	R	G	G	N	N	N	G	G
FAA	14.7 Engine fire, severe damage, or separation.	R	R	R	R	R	G	G	N	N	N	G	G

Abb. 5: Anforderungserfassung für einen Flugsimulator für spezifische Ausbildungsinhalte gem. [1]

Die Grundlage für die Beurteilung der Eignung erfolgt nach Definition der Anforderungen auf Grund von bereits eingangs erwähnten Testkatalogen für objektive und subjektive Tests. Mit deren Hilfe kann der Nachweis erbracht werden, dass die zuvor definierten Anforderungen durch den eingesetzten Flugsimulator erfüllt werden.

3.3 Anforderungserfassung und Bewertung von Fahrsimulatoren

Die im vorherigen Kapitel beschriebene Systematik soll auf die im Rahmen dieses Arbeitspaketes anstehende Aufgabe einer vorläufigen Bewertung der Eignung des RMS angewendet werden. Hierfür wird der Ablauf in geeigneter Weise modifiziert und die nun folgenden Arbeitsschritte strukturiert.

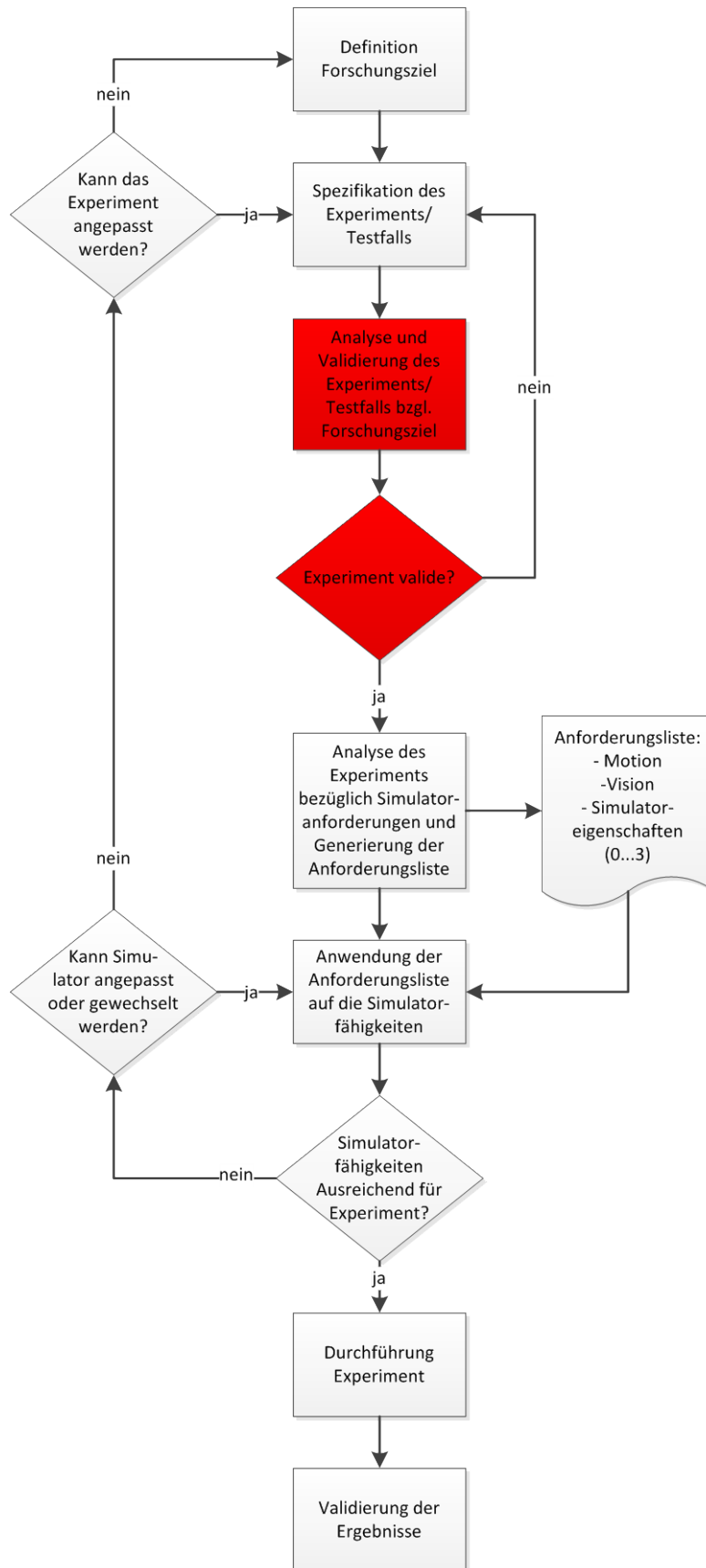


Abb. 6: Prozess der Evaluierung von Fahrzeugsimulatoren

3.3.1 Definition des Forschungsziels

Die zu den Ausbildungsinhalten analoge Definition des allgemeinen Einsatzzweckes erfolgt durch die Festlegung der durch das Projekt verfolgten Forschungsziele. Diese ergeben sich aus den Projektzielen welche wiederum im Projektplan für das Gesamtprojekt und die Teilprojekte festgelegt sind.

3.3.2 Spezifikation der Testfälle

Basierend auf den definierten Einsatzziele werden die Nachweisverfahren in Form von Anwendungsfällen definiert. Hierzu werden typische Fahrmanöver beschrieben und deren Ablauf geplant. Zusätzlich werden die aufzuzeichnenden Größen und gegebenenfalls einzuhaltende Toleranzen festgelegt. Aus der Spezifikation der Testfälle ergeben sich unter Berücksichtigung der Eingangssignale erste Anforderungen an die Fahrsimulatoren.

Die spezifizierten Testfälle werden in einer ersten Evaluation auf ihren Nutzen für das Forschungsziel untersucht. Ziel ist hierbei die Vermeidung von zu hohen oder zu geringen Anforderungen an die Simulationsanlage. Während zu geringe Anforderungen die Aussagekraft der Experimente in Frage stellt, kann eine zu hohe Anforderung zu unnötigen Kosten führen oder eine vermeintlichen Fähigkeitslücke bescheinigen. Im schlimmsten Fall werden Forschungsergebnisse nicht intern bzw. gar nicht erbracht, obwohl die Ausstattung dies zugelassen hätte.

3.3.3 Vorauswahl der Fahrsimulatoren und Definition der Anforderungen

Das DLR betreibt an verschiedenen Standorten eine Reihe von Bewegungssimulatoren. Diese sind unterschiedlich stark an den Einsatz als Fahrsimulator angepasst. Bereits im Projektplan wurden der Dynamische Fahrsimulator des Instituts für Verkehrssystemtechnik in Braunschweig und der Robotic Motion Simulator des Instituts für Systemdynamik und Regelungstechnik in Oberpfaffenhofen wegen ihrer Grundausstattung als am besten geeignet identifiziert. Beide Konzepte besitzen durch die Möglichkeit, verschiedene Cockpitstrukturen zu nutzen, eine hohe Flexibilität. Auf beide Simulatoren und deren technische Kenngrößen sowie systematische Unterschiede wurde bereits in [1] eingegangen. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist in Ergänzung hierzu die konkrete Festlegung von Anforderungen, welche sich aus der Definition der Testfälle ergeben.

Zu diesem Zweck muss für jeden Testfall eine Bewertung der Relevanz einzelner Subsysteme durchgeführt werden. Darauf aufbauend wird die vom Subsystem geforderte Qualität analog zu den Definitionen der ICAO9625 in den vier aus dem vorangehenden Unterkapitel bekannten Einstufungen festgelegt.

3.3.4 Prüfung der Einhaltung der Anforderungen

Auf der Grundlage der Definition von Anforderungen an die Fahrsimulatoren ist mit Hilfe von technischen Kenngrößen eine erste qualifizierte Aussage über die Eignung eines Fahrsimulators möglich. Diese Aussage beinhaltet entsprechend der Datengrundlage keine Messdaten. Diese werden erst im Zuge des Funktionsnachweises oder durch Simulationen erbracht.

Ein weiterer Arbeitsschritt wird in dem Fall notwendig, in dem die Prüfung eine Abweichung von Anforderungen und technischen Eigenschaftenn ergibt. In diesem Fall ist zu klären inwieweit der Simulator im Sinne der Testdefinition ertüchtigt bzw. ob auch mit verminderter

Simulationsqualität und ggf. mit anderer Testmethodik der gewünschte Nachweis erbracht werden kann.

3.3.5 Festlegung der Testverfahren

In einem weiteren Schritt wird der Nachweis zur Einhaltung der Anforderungen vorbereitet. Auf Grund der Anforderungen an den Fahrsimulator werden die Testszenarien um Messgrößen ergänzt. Diese wiederum werden, wo möglich, mit Toleranzen versehen. Zusätzlich werden die Messverfahren beschrieben.

3.3.6 Durchfahren des Testkataloges

Das Durchfahren des Testkataloges bildet den Abschluss der Evaluierung des Fahrsimulators. Auf der Grundlage der gemessenen Größen und durch Abgleich mit den im Testkatalog definierten Toleranzen kann dessen Eignung für einen, mehrere oder alle Testfälle nachgewiesen werden.

4 Anforderungskatalog an Fahrsimulatoren

Die Eignung eines Fahrsimulators zur Erbringung fundierter Erkenntnisse im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen muss an Hand definierter Kriterien erfolgen. Hierzu werden im Rahmen dieses Projektes Anforderungen aufgestellt und deren Erfüllungsgrad durch die Anwendung von Bewertungskriterien nachgewiesen. In der Folge werden sowohl die möglichen Anforderungen als auch die Kriterien zur Bewertung der Erfüllung aufgelistet. Es wird darauf hingewiesen, dass allein durch diese Liste keine Aussage bezüglich der Eignung oder Güte eines Simulators gemacht werden kann. Diese ergibt sich erst aus dem Vergleich der Simulatoreigenschaften mit den konkreten Anforderungen aus dem Projekt. Es ist jedoch sehr wohl möglich an Hand dieses Kataloges eine Analyse der zur Verfügung stehenden Anlage für bestimmte Fahrscenarien durchzuführen und daraus eine Übersicht über die technischen Fähigkeiten zu erstellen. Mit Hilfe dieser Beschreibung ist dann eine schnelle Bewertung zukünftiger Aufgaben möglich.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Bewertungskriterien nicht mit technischen Daten hinterlegt sind. Zum einen sind solche Grenzwerte auf Grund der nicht ausreichend entwickelten Wahrnehmungsmodelle nicht eindeutig festzulegen. Zum zweiten sind Grenzwerte wie beispielsweise die Anforderung an die Validität des Fahrzeugmodells einschließlich nicht vorhersehbarer Fahrerreaktionen wenn überhaupt nur mit hohem Aufwand über den gesamten Testverlauf nachweisbar. Drittens sind diese Grenzwerte hochgradig sowohl vom simulierten Fahrzeug wie auch vom Testablauf abhängig. All diese Gründe widersprechen einer allgemeingültigen Festlegung von technisch notwendigen Randbedingungen.

Die folgende Aufstellung gibt stattdessen konkrete Bewertungsmaßstäbe. Mit deren Hilfe kann der Erfüllungsgrad in vier Stufen beschrieben werden. Hierbei steht die Stufe „0“ für eine nicht vorhandene Funktionalität während die Stufe „3“ die technisch bestmögliche bzw. maximal notwendige Ausstattung darstellt.

4.1 Bewegungssystem (MOT)

1.1 Arbeitsbereich/Beschleunigung (rotatorisch)	
0	keine Bewegung, Beschleunigungsdarstellung irrelevant
1	skaliert und gefiltert
2	Manöver skaliert fahrbar
3	Manöver im Arbeitsbereich fahrbar

1.2 Arbeitsbereich/Beschleunigung (translatorisch)	
0	keine Bewegung, Beschleunigungsdarstellung irrelevant
1	Tiltkoordination greift ein
2	Manöver skaliert fahrbar
3	Manöver im Arbeitsbereich fahrbar

1.3 Frequenzband (Phasengang)	
0	keine Bewegung, Beschleunigungsdarstellung irrelevant
1	manöverspezifische Frequenzen mit deutlichem Phasenverzug
2	manöverspezifische Frequenzen mit geringem oder keinem Phasenverzug darstellbar
3	alle vorkommenden Frequenzen ohne Zeitverzug darstellbar

1.4 Frequenzband (Amplitudengang)	
0	keine Bewegung, Beschleunigungsdarstellung irrelevant
1	manöverspezifische Amplituden teilweise darstellbar
2	manöverspezifische Amplituden im Wesentlichen darstellbar
3	Amplitudengang originalgetreu

1.5 Beschleunigungsrichtung und -amplitude	
0	keine Bewegung, Beschleunigungsdarstellung irrelevant
1	Wirkrichtung der Beschleunigung mit Abweichungen darstellbar, Amplitude skaliert darstellbar
2	Wirkrichtung der Beschleunigung darstellbar, Amplitude skaliert darstellbar
3	Manöver ohne Einschränkungen umsetzbar

4.2 Motion Cueing (MC)

2.1 Anforderung Motion Cueing	
0	keine Bewegung
1	Motion Cueing nach Stand der Technik
2	an das Experiment angepasste Parametrierung
3	an das Experiment angepasster Algorithmus

4.3 Control Loading (HAP)

3.1 Frequenzband Seatshaker	
0	kein Seatshaker
1	Seatshaker mit stochastischer Anregung
2	Seatshaker mit vordefinierten Frequenzbändern
3	Seatshaker stellt exakten Frequenzverlauf dar

3.2 Force Feedback	
0	Kein Force Feedback
1	Unzureichende Kraftentwicklung, vereinfachte Kräfteberechnung, nur Federpakete
2	Realistische Kräfte aus Dynamikmodell
3	speziell angepasste Hardware/Software

4.4 Cockpit (CP)

4.1 Realitätsnähe	
0	keine Übereinstimmung mit existierenden Instrumentierungen, rein generische Anzeigen, ganze Instrumentengruppen fehlen
1	funktionale Übereinstimmung mit existierenden Instrumentierungen, exakter Nachbau von einzelnen Funktionsgruppen, graphische Nachbildung von Instrumenten
2	alle Instrumente verfügbar, graphische Nachbildung von Instrumenten zulässig
3	exakter Nachbau (evtl. mit Originalteilen) eines existierenden Cockpits, alle Instrumente vorhanden und funktionstüchtig,

4.2 Flexibilität (Hardware)	
0	Cockpit ist nicht anpassbar, Anpassbarkeit nicht gefordert
1	Cockpit ist in wenigen Teilen anpassbar
2	Cockpit ist in wesentlichen Teilen anpassbar
3	Cockpit ist vollständig anpassbar

4.3 Flexibilität (Software)	
0	Keine Softwareänderung notwendig
1	Software bzgl. Experiment parametrisierbar
2	Software einzelner Module vollständig variierbar
3	Software kann vollständig variiert werden

4.4 Ergonomie (Cockpit)	
0	Ergonomie nicht relevant für Experiment
1	Ergonomie kann Ergebnis einschränken
2	Ergonomie der Experimentrelevanten Teile exakt
3	Ergonomie stimmt mit Original überein

4.5 Außensicht (VIS)

5.1 Sichtfeld (horizontal)	
0	kein Sichtfeld notwendig, Sichtfeld für Experiment irrelevant
1	Sichtfeld eingeschränkt
2	Sichtfeld stimmt weitestgehend mit Original überein
3	Sichtfeld stimmt mit Original überein

5.2 Sichtfeld (vertikal)	
0	kein Sichtfeld notwendig, Sichtfeld für Experiment irrelevant
1	Sichtfeld eingeschränkt
2	Sichtfeld stimmt weitestgehend mit Original überein
3	Sichtfeld stimmt mit Original überein

5.3 Sichtabstand	
0	keine Visualisierung nötig, Sichtabstand für Experiment irrelevant
1	Sichtabstand stimmt teilweise mit Original überein
2	Sichtabstand stimmt weitestgehend mit Original überein
3	Sichtabstand stimmt mit Original überein

5.4 Helligkeit	
0	keine Visualisierung nötig, Helligkeit für Experiment irrelevant
1	Helligkeit stimmt teilweise mit Original überein
2	Helligkeit stimmt weitestgehend mit Original überein
3	Helligkeit stimmt mit Original überein

5.5 Edgeblending/Farbtreue	
0	keine Visualisierung nötig, Edgeblending / Farbtreue irrelevant
1	Edgeblending / Farbtreue vorhanden aber mit Einschränkungen (deutlich sichtbare Unterscheide)
2	Edgeblending vorhanden, Farbtreue nicht kalibriert aber realistisch
3	Edgeblending vorhanden, kalibrierte Farbtreue

5.6 Auflösung	
0	keine Visualisierung nötig, Auflösung irrelevant
1	Auflösungsanforderungen gering
2	Auflösungsvermögen ausreichend für Experiment
3	Auflösungsvermögen des Auges wird erreicht / übertroffen

5.7 Bildwiederholrate / -synchronisation / Konstanz	
0	keine Visualisierung nötig, Auflösung irrelevant
1	Ruckelnde / unsynchronisierte / variierende Bildwiederholraten ausreichend
2	<input type="checkbox"/> 25 FPS / unsynchronisierte, nach oben variierende Bildwiederholraten
3	30/60 FPS / Synchronisierte, konstante Bildwiederholraten

5.8 Simulationsqualität atmosphärischer Effekte	
0	keine Visualisierung nötig, Atmosphärische Effekte irrelevant
1	Stark vereinfachte atmosphärische Effekte
2	Funktionale Simulation atmosphärischer Effekte
3	Exakte Simulation atmosphärischer Effekte

5.9 Parallaxeffekte / Stereo / Headtracker	
0	keine Visualisierung nötig, Parallaxe irrelevant
1	Headtracker + Stereo zur Simulation von Parallaxe mit eingeschränkter Qualität
2	Headtracker + Stereo zur Simulation von Parallaxe mit hoher Qualität
3	Sichtabstand ausreichend um Parallaxe optisch zu erzeugen

5.10 Bildqualität	
0	keine Visualisierung nötig, Bildqualität für Experiment irrelevant
1	geringe Bildqualität deutliche Schliereneffekte
2	Bildqualität ausreichend, geringe Schliereneffekte
3	Scharfes Bild, keine Schliereneffekte

5.11 Reaktionszeit/Zeitverzug	
0	keine Visualisierung nötig, Reaktionszeit irrelevant
1	deutlicher Zeitverzug
2	ausreichende Reaktionszeit (< 40 ms)
3	sehr schnelle Reaktionszeit

5.12 Realitätsgrad / Detailgrad der Szenerie	
0	keine Visualisierung nötig, Realitätsgrad irrelevant
1	stark vereinfachte Modelle
2	komplexe, detaillierte Modelle
3	realistisches Szenario mit hochauflösenden, realitätsgetreuen Modellen

4.6 Simulation (SIM)

6.1 Verkehr	
0	keine Verkehrssimulation
1	Verkehr nur passiv, kein Einfluss auf Experiment
2	Passiver Verkehr mit Kollisionsmodell und Beachtung der Verkehrsregeln
3	Auf Simulation reagierender Verkehr, angepasste Szenarien

6.2 Personen	
0	Keine Personensimulation
1	Personen nur als Animation, kein Einfluss auf Experiment
2	Personen als Teil der Simulation, stochastisches Verhalten
3	Auf Simulation reagierende Personensimulation, angepasste Szenarien

6.3 Umfang der Szeneriedatenbank	
0	Keine Szenerie notwendig
1	Minimale Szenerie, Freifahrfläche
2	Straßenverlauf vorgegeben, generische Landschaft, für Experiment ausreichende Strecke
3	Realistische Strecke, reales Szenario, Objektkollisionen, Verkehrsleitsysteme, Beschilderung, ...

6.4 Detaillierungsgrad der Strecke	
0	Detaillierungsgrad nicht relevant
1	minimale Straßenbeschreibung
2	detaillierte Straßenbeschreibung aber ohne detaillierte Bodenunebenheitsmodellierung
3	detaillierte Straßenbeschreibung mit detaillierter Bodenunebenheitsmodellierung

6.5 Adaptionmöglichkeit des Szenarios	
0	Keine Adaption notwendig
1	erhöhter Zeitaufwand für Anpassungen
2	Anpassungen können schnell umgesetzt werden
3	Anpassungen zur Laufzeit möglich

4.7 Geräuschsimulation (AUD)

7.1 Störgeräusche / Geräuschdämmung	
0	Störgeräusche irrelevant
1	deutlich wahrnehmbare Störgeräusche
2	Störgeräusche vorhanden aber gering im Vergleich zur Geräuschkulisse der Simulation
3	Keine wahrnehmbaren Störgeräusche

7.2 Betriebsgeräusche des simulierten Fahrzeugs	
0	Betriebsgeräusche irrelevant
1	Betriebsgeräusche des Fahrzeugs werden generisch approximiert
2	Einzelne Betriebsgeräusche werden exakt wiedergegeben
3	Alle Betriebsgeräusche wie im Original

7.3 Umgebungsgeräusche	
0	Umgebungsgeräusche irrelevant
1	Umgebungsgeräusche des Fahrzeugs werden generisch approximiert
2	Einzelne Umgebungsgeräusche werden exakt wiedergegeben
3	Alle Umgebungsgeräusche wie im Original

7.4 Dynamische Soundeffekte	
0	Keine dynamischen Soundeffekte, Effekte irrelevant
1	Dynamische Soundeffekte werden generisch approximiert
2	Einzelne dynamische Soundeffekte werden exakt wiedergegeben
3	Alle dynamische Soundeffekte wie im Original

7.5 Interne und externe Quellen	
0	Keine Audioeffekte, Effekte irrelevant
1	Nur Kopfhörer
2	Nur Simulatorzellen interne Soundquellen
3	Interne und externe Soundquellen

7.6 Surround Sound	
0	Keine Audioeffekte, Effekte irrelevant
1	Stereo-Sound
2	Surround Sound
3	Speziellösung

4.8 Dynamik (DYN)

8.1 Validierung	
0	Keine Validierung notwendig
1	Generische, Teilvalidierte Modelle, in Simulation validiert
2	Teilvalidierte Modelle, auf Hardwareprüfständen validiert
3	Vollständige, auf Hardwareprüfständen validierte Modelle

8.2 Modellierungstiefe/Vollständigkeit	
0	Detaillierungsgrad irrelevant
1	generische Dynamikmodell (z.B. Einspurmodell)
2	Erweitertes Dynamikmodell (z.B. Zweispurmodell, generisches Fahrwerk, vereinfachter Rad-Bodenkontakt)
3	Detaillierte, komplexe Dynamikmodellierung

8.3 Validität des Modells	
---------------------------	--

0	Betriebsbereich des Dynamikmodells für Experiment nicht relevant
1	Modell muss nicht über den gesamten Betriebsbereich des Experiments valide sein
2	Modell im Betriebsbereich des Experiments valide
3	Modell über Experimentparameter hinaus valide

4.9 Verschiedenes (MISC)

9.1 Kooperative Nutzung	
0	Kein Kooperatives Training nötig
1	Externe Einfluss/Rückmeldungen von Instruktor möglich
2	Begleitperson im Simulator nötig
3	Simulatorverbund mit mehreren Simulatoren in derselben Simulation

9.2 Evaluierungsmöglichkeiten (Kameraaufzeichnung, Stimmenaufzeichnung, Telemetrieauswertung)	
0	Keine Aufzeichnung nötig
1	Beobachtung möglich ohne Aufzeichnung
2	Beobachtung möglich mit Aufzeichnung
3	Beobachtung mit Aufzeichnung der Simulationssituation

9.3 Ergonomie (Einstieg)	
0	Einstieg mühsam / nicht für alle Körperformen geeignet
1	Einstieg umständlich / für einen Großteil aller Körperformen geeignet
2	Einstieg mühelos (bzw. realistisch) / für (fast) alle Körperformen geeignet
3	Spezialanforderungen, eventuell Behindertengerecht

9.4 Sicherheit (Zugelassenes Personal)	
0	Jeder/ keine Anforderungen
1	Nur eingewiesenes Personal
2	Speziell geschultes Personal (z.B. Testfahrer) nötig
3	Nur Betrieb mit Testdummies / Unbemannter Betrieb

9.5 Festinstallation notwendig / Transportabler Simulator	
0	Experiment unabhängig von Standort
1	Experiment erfordert speziellen, nicht variierenden Standort
2	---
3	Experiment muss an wechselnden Orten durchgeführt werden

9.6 Gemeinsames Testprotokoll / Testumgebung / Auswertungsformular für Personentests	
0	nicht vorgesehen
1	Einzelexperiment / spezifische Fragen
2	Auswahl aus einem Fragenkatalog
3	standardisierte Fragebögen / Testumgebung / Protokoll

9.7 Vordefinierte Testtrajektorien ISO Norm (Automotive) Flugzeug?	
0	frei gestaltete Trajektorie
1	intern standardisierte Trajektorie
2	Trajektorie mit ISO-normierten Teilabschnitten
3	Trajektorie in ISO-Norm enthalten

9.8 Evaluierung mit Berücksichtigung eines Wahrnehmungsmodell	
0	kein Wahrnehmungsmodell
1	vereinfachtes Wahrnehmungsmodell zur Evaluierung
2	Wahrnehmungsmodell nach Stand der Technik
3	spezifisches Wahrnehmungsmodell notwendig zur Evaluierung

5 Aufstellen des Testkataloges

Die Zusammensetzung des Testkataloges spielt für die spätere Eignungsbeurteilung eine entscheidende Rolle. Umso mehr muss die Sinnhaftigkeit der Zusammenstellung geprüft und mit den Inhalten und Zielen des Projektes abgestimmt sein. In der jetzigen frühen Projektphase ist dies jedoch nicht abschließend zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird für den aktuell zu erreichende Meilenstein lediglich eine vorläufige Bewertungsanalyse des Robotic Motion Simulators auf der Grundlage der bislang als relevant erachteten Tests durchgeführt.

Innerhalb dieses Kapitels werden diese Tests definiert und die daraus folgenden Anforderungen benannt. Weitere Tests werden im Verlauf des Projektes hinzukommen. Mit diesen ersten Versuchen wird die Wirksamkeit der oben definierten Systematik nachgewiesen.

5.1 Doppeltes Spurwechselmanöver

5.1.1 Allgemeine Beschreibung

Es soll im Experiment das Durchfahren des standardisierten, doppelten Spurwechselmanövers nach ISO 3888-1 untersucht werden. Hierbei ist es Aufgabe des Fahrers, zwischen zwei versetzt aufgebauten Pylonenreihen zu fahren, wobei diese Aufgabe entweder mit parallelem Spurwechsel oder mit klassischer Lenkung gefahren werden kann.

Die Geschwindigkeit bei Durchfahren des Spurwechsels bestimmt hierbei die Machbarkeit des Manövers sowie die auftretenden Kräfte.

Das ROMO soll nun im Simulator durch einen Fahrer interaktiv durch den Spurwechsel gesteuert werden. Hierbei soll untersucht werden, wie die auftretenden Kräfte die Performanz der Steueraufgabe beeinflussen und verschiedene HMI Abstimmungen untersucht werden. Es ist zu beachten, dass Simulatoreinflüsse wie die Tilt-Koordination auf ein Minimum beschränkt werden, um den Dynamikeinfluss auf die Sidestick Arm Kombination möglichst nicht zu verfälschen. Im Idealfall soll das Manöver im Simulator 1:1 gefahren werden können, wobei die longitudinale Bewegung des Fahrzeugs wegen der geringen Beschleunigungen in diese Richtung klassisch gefiltert werden kann.

Des Weiteren ist auf eine möglichst exakte Nachbildung der Ergonomie zu achten (Sitzposition, Sidestickposition) um den Einfluss einer veränderten Armstellung ausschließen zu können.

5.1.2 Analyse des Experiments

Beim realen Durchfahren des doppelten Spurwechsels treten je nach Betriebsart der Lenkung (klassische Lenkung, paralleler Spurwechsel) Gier und Wankbewegungen des Fahrzeugs oder nur Wankbewegungen auf. Auf den Fahrer wirken hauptsächlich Querbeschleunigungen. Anhand eines geregelten Fahrzeugmodells wurden die voraussichtlich auftretenden Beschleunigungen und Drehraten für verschiedene Geschwindigkeiten simuliert (siehe Abbildung 7 - 16). Es zeigt sich, dass der doppelte Spurwechsel ein dynamisches Manöver ist, das bereits bei 30 km/h maximale Lateral-Beschleunigungen von 1.3 m/s^2 erfordert. Soll das Manöver lateral 1:1 im Simulator umgesetzt werden, so ist ein lateraler Arbeitsraum von 3,5 Metern erforderlich. Bei 65 km/h sind bereits maximale Lateral-Beschleunigungen von 5 m/s^2 vorhanden, die mit den vorhandenen Simulatoren am DLR voraussichtlich nicht wiedergegeben werden können. Die deshalb nötige Tilt-Koordination oder Skalierung der Beschleunigung würde bei diesen

Geschwindigkeiten deshalb zu verfälschenden Einflüssen auf die Arm-Sidestick und zu nicht interpretierbaren Ergebnissen führen. Für die Experimente am Simulator sollte deshalb die Fahrgeschwindigkeit so reduziert sein, dass die Beschleunigungen 1:1 wiedergegeben werden können. Für die Anforderungsliste an den Bewegungssimulator wird deshalb zunächst mit den Simulationsergebnissen bei 30 km/h gearbeitet.

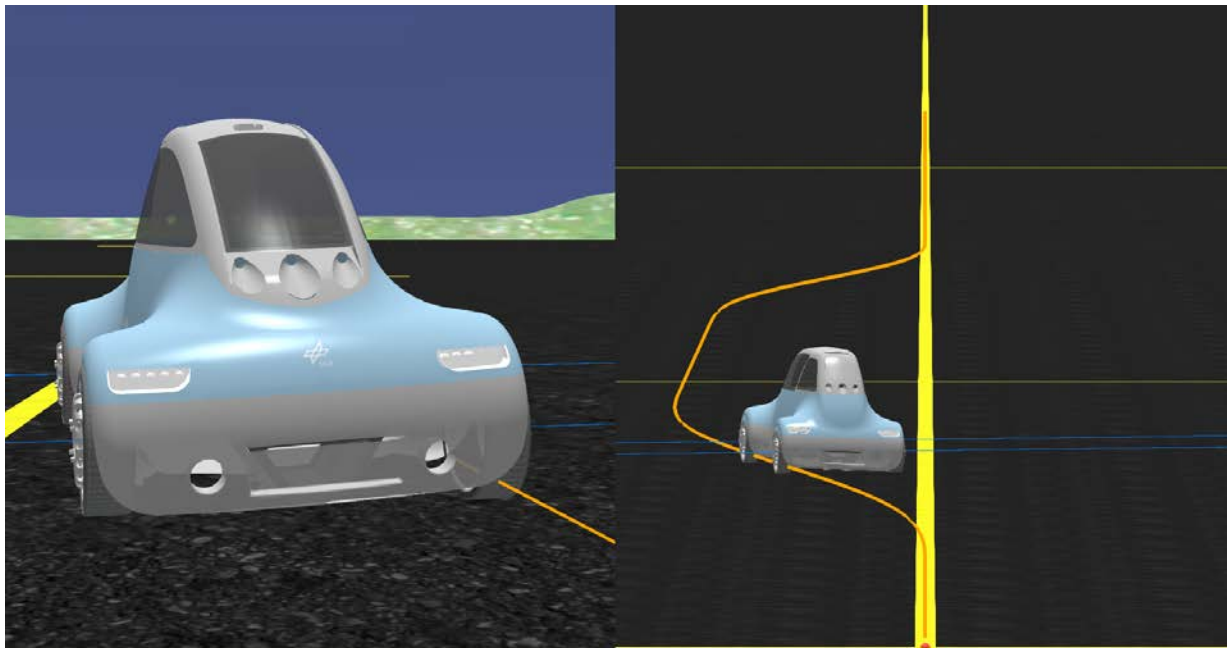


Abb. 7: Fahrdynamik Simulation Spurwechsels mit Modelica

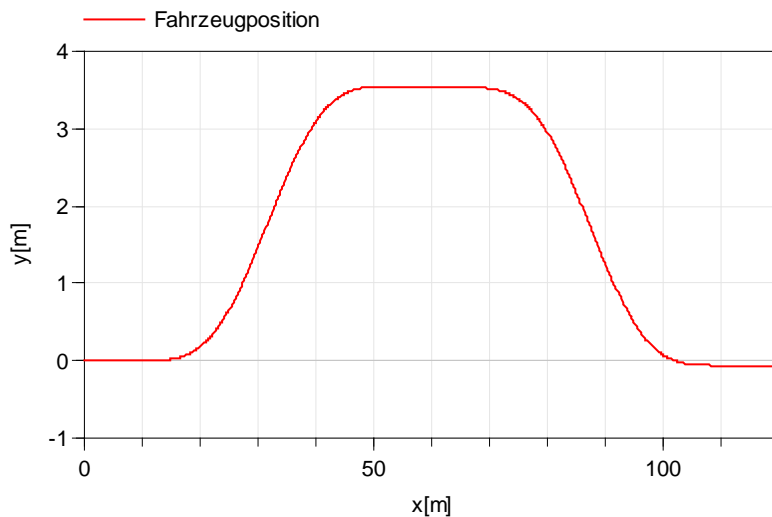


Abb. 8: Fahrzeugposition beim Durchfahren des doppelten Spurwechsels

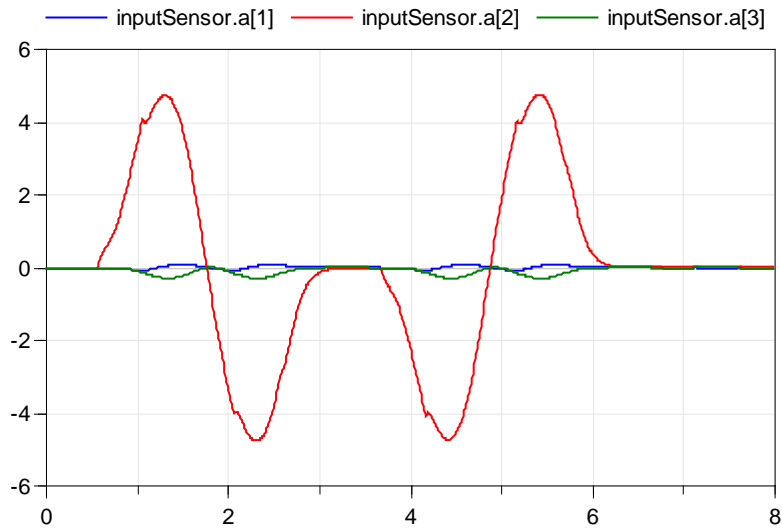


Abb. 9: Beschleunigungen in m/s² aus Sicht des Fahrers (klassische Lenkung, 65 km/h)

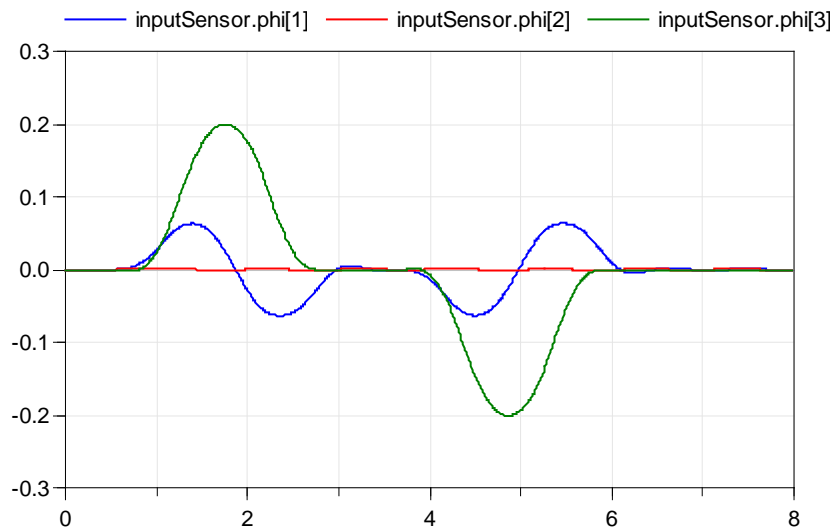


Abb. 10: Wank, Nick und Gierwinkel in rad des Fahrzeugs (klassische Lenkung, 65 km/h)

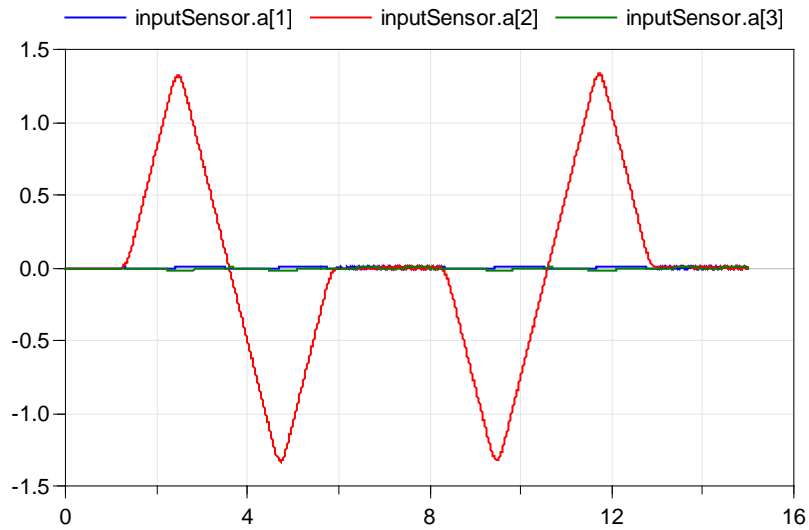


Abb. 11: Beschleunigungen in m/s² aus Sicht des Fahrers (klassische Lenkung, 30 km/h)

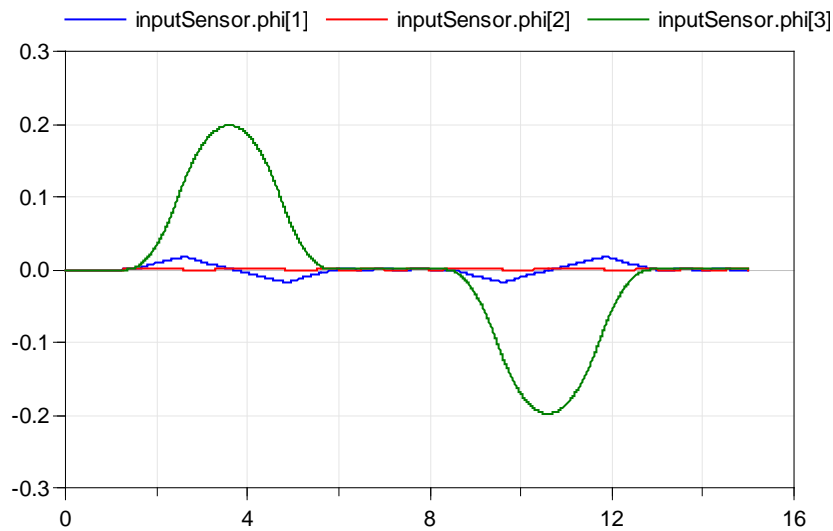


Abb. 12: Wank, Nick und Gierwinkel in rad des Fahrzeugs (klassische Lenkung, 30 km/h)

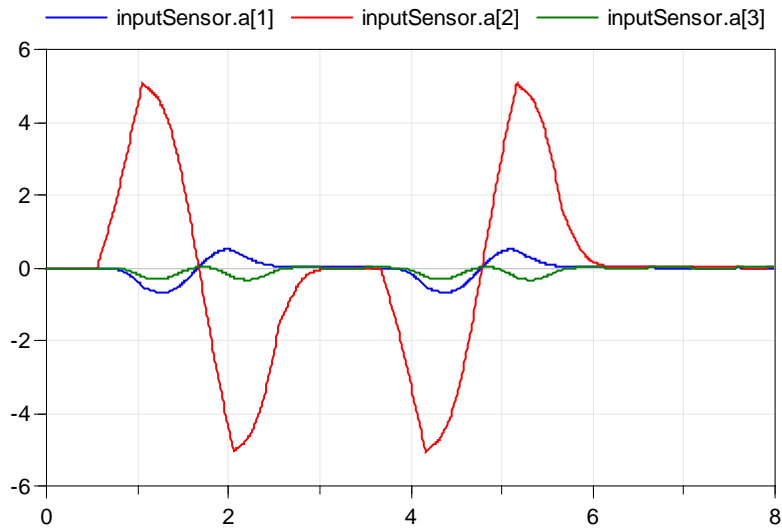


Abb. 13: Beschleunigungen in m/s² aus Sicht des Fahrers (parallele Lenkung, 65 km/h)

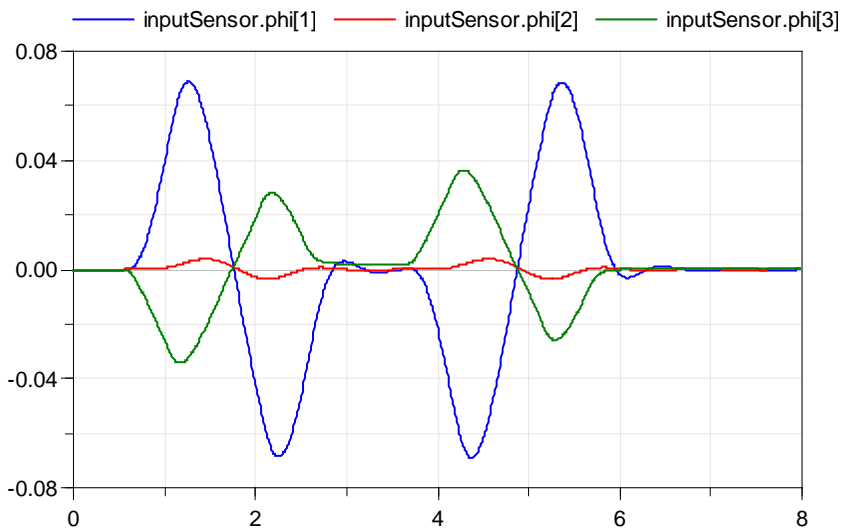


Abb. 14: Wank, Nick und Gierwinkel in rad des Fahrzeugs (parallele Lenkung, 65 km/h)

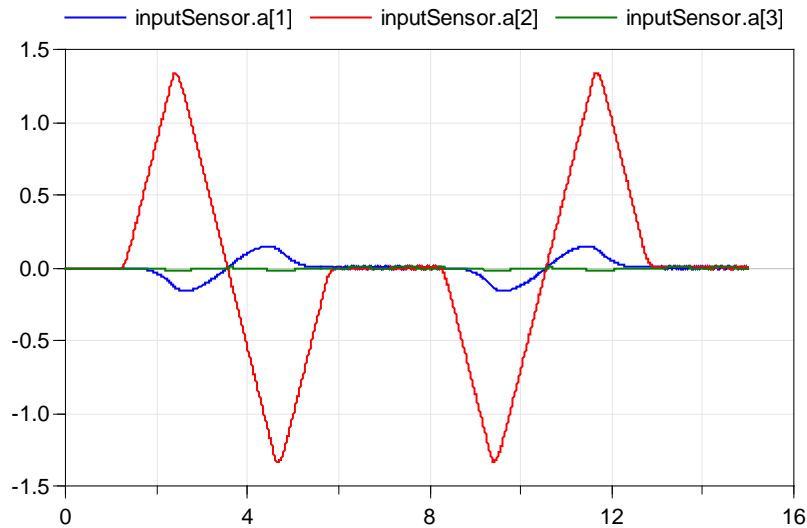


Abb. 15: Beschleunigungen in m/s^2 aus Sicht des Fahrers (parallele Lenkung, 30 km/h)

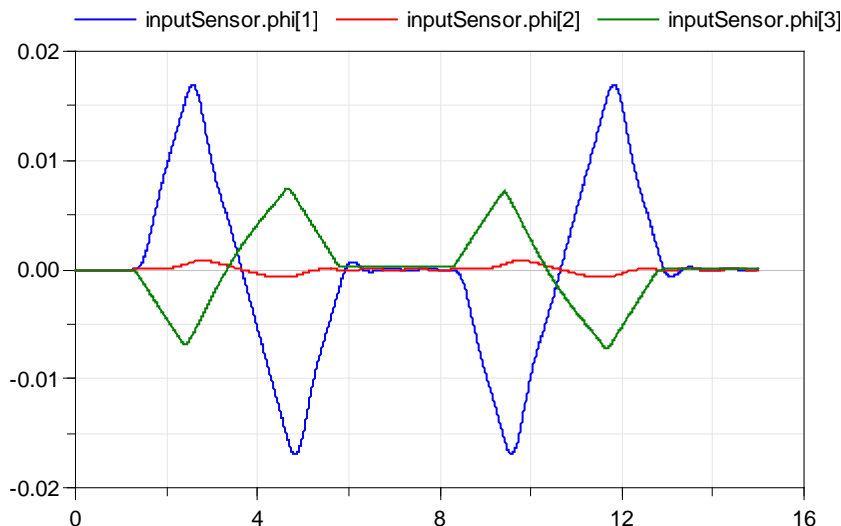


Abb. 16: Wank, Nick und Gierwinkel in rad des Fahrzeugs (parallele Lenkung, 30 km/h)

5.1.3 Anforderungen an den Fahrsimulator

Das folgende Diagramm gibt die sich aus der Durchführung des Testfalls ergebenden Anforderungen an einen Fahrsimulator wieder. Da für die Anforderungen aus beiden Teilversuchen für verschiedene Geschwindigkeiten gleich sind, werden beide Versuche durch eine Grafik repräsentiert. Die dem Diagramm zu Grunde liegende Tabelle ist dem Anhang dieses Berichtes beigelegt. Erkennbar ergeben sich die höchsten Anforderungen für die Bereiche Bewegungssimulation, Sichtsystem, Steuerkraft sowie der Nachbearbeitung und Analyse der Versuchsergebnisse.

6 Erste Bewertungsanalyse RMS

Auf der Grundlage der Anforderungen durch die Testverfahren werden unter Berücksichtigung der Versuchsziele in diesem Kapitel die Systemeigenschaften des RMS für die jeweiligen Testfälle bewertet. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel grafisch zusammengestellt. Die zu Grunde liegenden Werte sind der Tabelle im Anhang dieses Berichtes zu entnehmen.

Es sei an dieser Stelle noch einmal für alle nachfolgenden Betrachtungen auf den bei weitem nicht vollständigen Testkatalog hingewiesen. Wie im Projektplan ausgewiesen, kann zu diesem Zeitpunkt lediglich eine erste Bewertung erfolgen. Die vollständige Bewertung ist erst nach Fertigstellung des Testkataloges im weiteren Projektverlauf möglich. Aus diesem Grund können sich beispielsweise nicht erfüllte Anforderungen im Gesamtbild als nicht relevante Einzelfälle bzw. deutlich übererfüllte Anforderungen als für andere Testfälle wichtige Eigenschaften erweisen. Ein deutlicher Unterschied liegt im Zuge dieses Berichtes in Fällen mit einer Differenz von mehr als einer Stufe zwischen Anforderung und Systemeigenschaft vor.

6.1 Doppeltes Spurwechselmanöver

6.1.1 Allgemeine Bewertung

Von den 46 aufgestellten Kriterien erfüllt der RMS für das doppelte Spurwechselmanöver in 30 Fällen die Anforderungen ohne Einschränkung. In zehn Fällen übersteigen die Fähigkeiten des Fahrsimulators die Anforderungen, davon in zwei Fällen wesentlich. In sechs Fällen werden die Anforderungen nicht vollständig erfüllt. Einschränkung gilt dies hiervon jedoch in vier Fällen nur für die höhere Geschwindigkeit. Keines der festgestellten Defizite ist mit mehr als einer Stufe Unterschied bewertet.

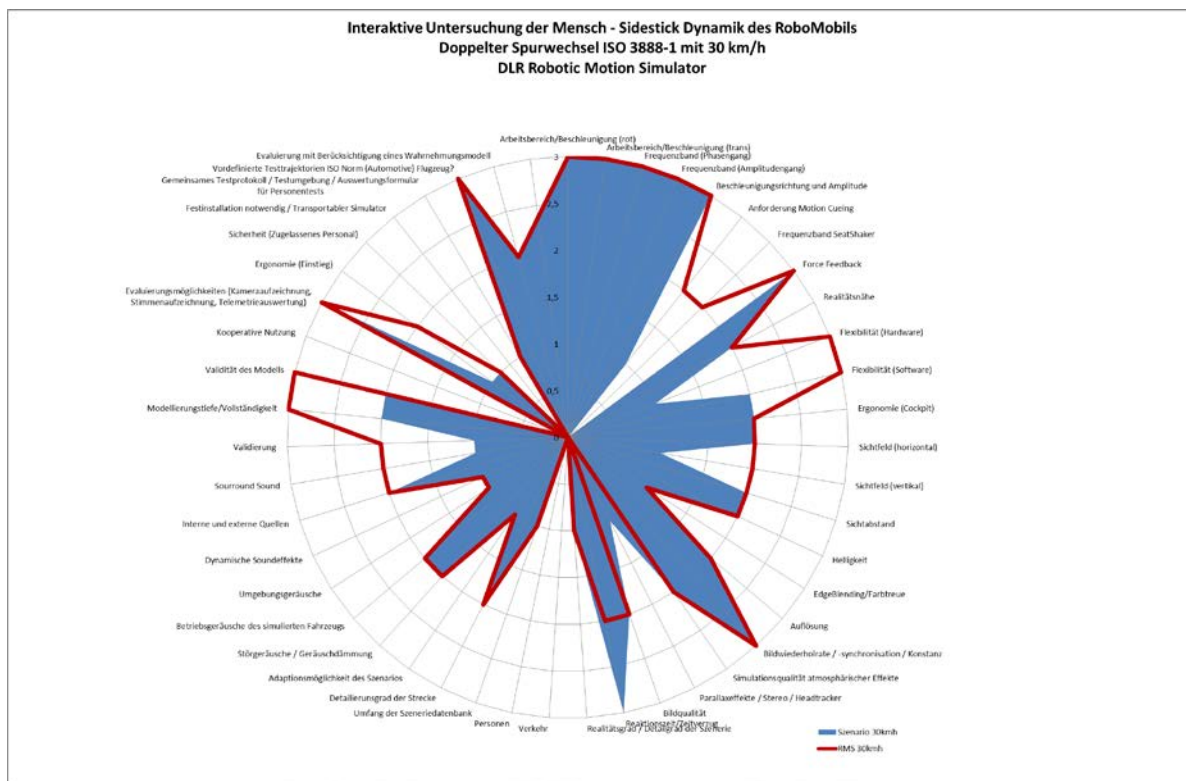


Abb. 19: Vergleich der Anforderungen an einen Fahrsimulator mit den Systemeigenschaften RMS für ein doppeltes Spurwechselmanöver bei 30 km/h

Bei der höheren Geschwindigkeit fällt die Häufung von nicht erfüllten Anforderungen im Bereich des Bewegungssystems auf. Hier ist eine Abhilfe auf Grund des damit verbundenen Aufwandes nicht leicht zu realisieren. Zum anderen ist schon für den Teilversuch mit geringerer Geschwindigkeit die Erfüllung der Anforderungen gegeben.

Bei niedriger Geschwindigkeit werden zwei Anforderungspunkte nicht erfüllt: Zum einen wird die geforderte Synchronität zwischen Bewegung und Visualisierung nach erster Abschätzung nicht erreicht. Zudem bietet das System nur eine Stereovisualisierung ohne Berücksichtigung der Parallaxeffekte.

Eine Verbesserung der Synchronität könnte erreicht werden, entweder, indem durch künstliches Verzögern der Visualisierungsdaten die Totzeit der Robotersteuerung ausgeglichen wird, oder durch eine neuere Version der Robotersteuerung mit geringerer Totzeit, was sich auch positiv auf die Systemdynamik im Allgemeinen auswirken würde.

Die fehlenden Parallaxeffekte könnten durch die Nachrüstung eines kommerziell verfügbaren Headtrackingsystems und die entsprechende Kopplung der Kopfposition an den Blickwinkel in der virtuellen Welt erzeugt werden.

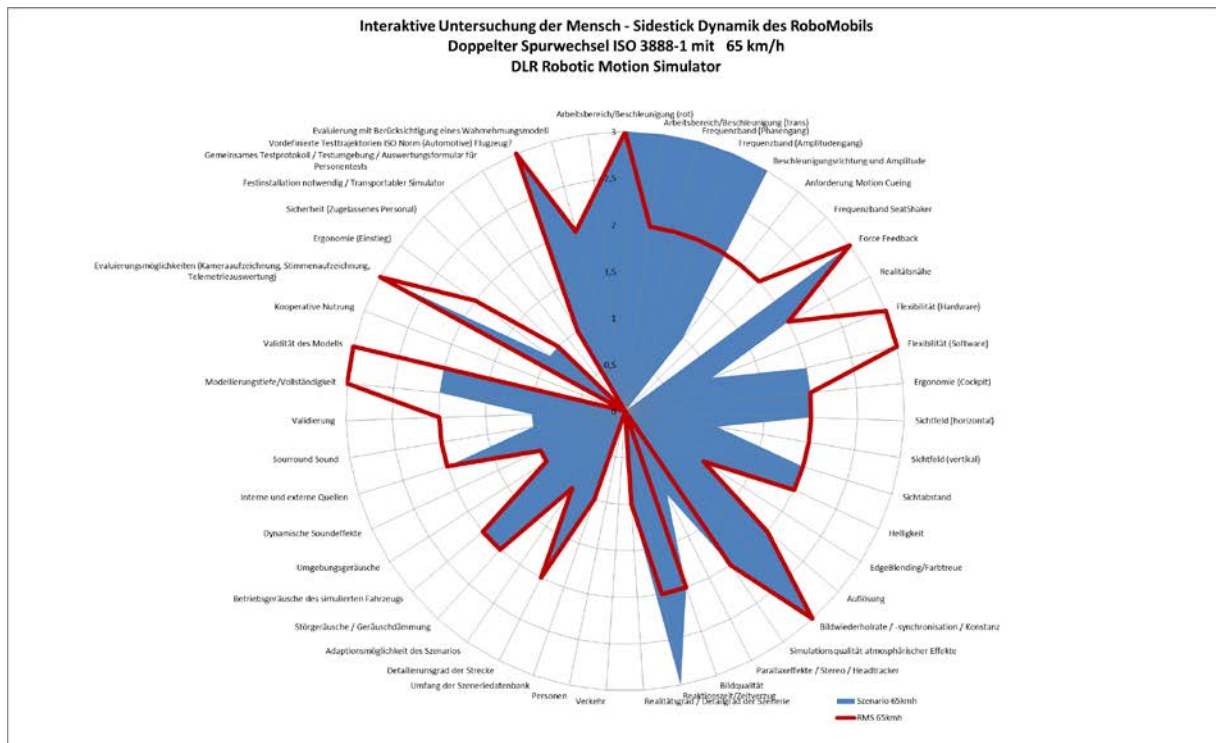


Abb. 20: Vergleich der Anforderungen an einen Fahrsimulator mit den Systemeigenschaften RMS für ein doppeltes Spurwechselmanöver bei 65 km/h

Von den zehn Fällen der übererfüllten Anforderungen fallen die beiden Kriterien „Flexibilität (Hardware)“ und „Frequenzband Seatshaker“ mit mehr als einer Stufe Differenz ins Auge. Die Flexibilität der Hardware hat hierbei Auswirkungen auf die Komplexität des Systems. Erhöhte Komplexität geht grundsätzlich mit einem höherem Aufwand einher, beispielsweise für die Erstellung und Pflege von Schnittstellen und ggf. einem höheren Gewicht. In jedem Fall entstehen hierdurch Kosten. Auf der anderen Seite wird durch diese Flexibilität eine Nutzung des zunächst als Flugsimulator konzipierten Bewegungssimulators erst möglich. Schon deshalb ist durch die erhöhte Flexibilität ein relevanter Nachteil nicht erkennbar.

6.2 Test Nr. UC 01 401: Vermeidung von Auffahrunfällen infolge von Geschwindigkeitsunterschieden

Der RMS erfüllt auch hier die Anforderungen aus der Versuchsbeschreibung zu großen Teilen sehr gut. Von den 46 Bewertungskriterien werden lediglich 8 nicht erfüllt. Hierbei ist das Sichtsystem auf Grund der vergleichsweise kleinen Projektionsfläche die begrenzende Komponente. Hier machen sich das eingeschränkte Sichtfeld und der kleine Abstand zwischen Augenpunkt und Bild bemerkbar. Größtes Defizit ist jedoch der darzustellende Verkehr. Die Versuchsdurchführung fordert hier eine sehr hohe Qualität, der RMS besitzt jedoch über keinerlei Fähigkeiten in diesem Punkt. Darüber hinaus gibt es kleinere Defizite bei der Bildwiederholrate und der Szenerie.

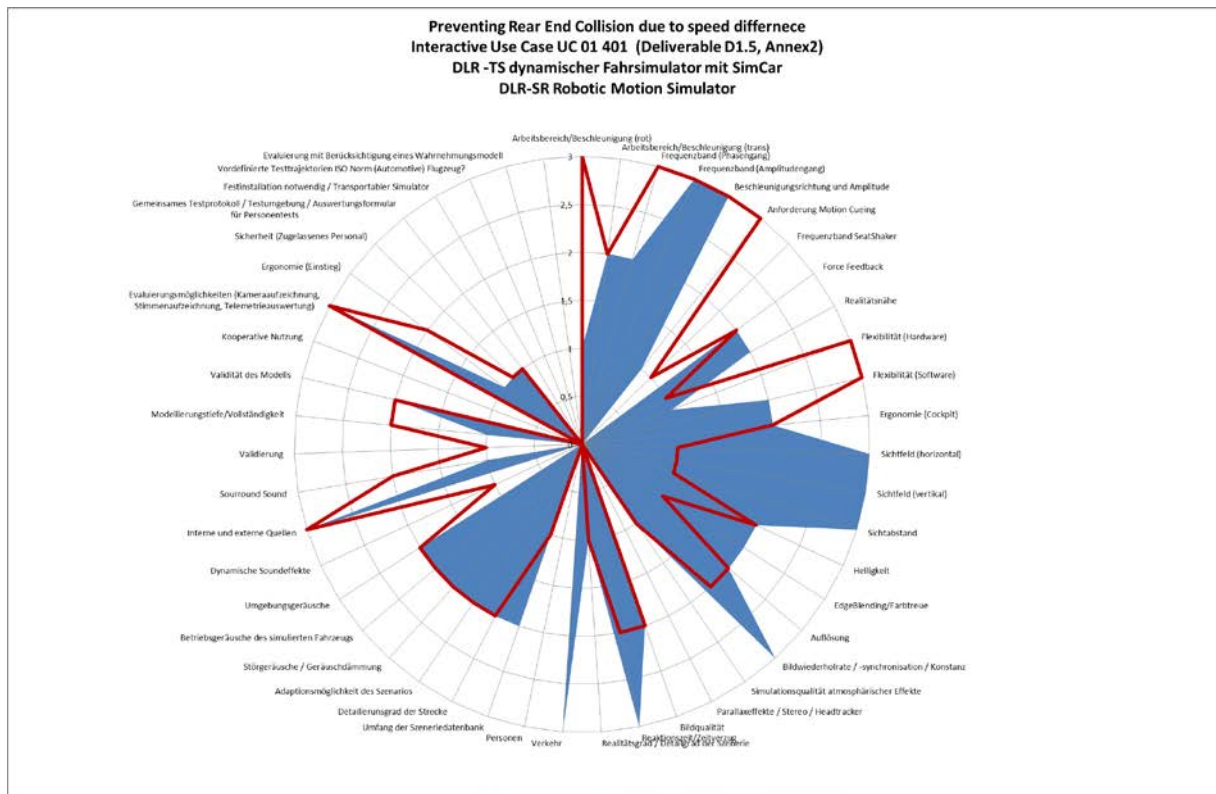


Abb. 21: Vergleich der Anforderungen an einen Fahrsimulator mit den Systemeigenschaften RMS für ein Manöver zur Vermeidung eines Auffahrunfalls

Auf Grund der hohen Qualität im Bereich der Bewegungssimulation sollte deshalb insbesondere beim Sichtsystem über Möglichkeiten zur Nachrüstung nachgedacht werden. Im Fall des größten Defizits, der Darstellung des Verkehrs, wäre eine Ausrüstung mit einer entsprechenden Datenbank und ggf. verbunden einem leistungsfähigeren Bildgenerator zu überlegen. Diese Maßnahme greift in den generellen Aufbau und hier insbesondere in die mechanische Konzeption des Systems lediglich in geringem Maß ein. Geht man davon aus, dass mit diesem Eingriff keine Änderung der Projektortechnik verbunden ist, sind über die Beschaffungskosten und den Aufwand für die softwareseitige Integration hinaus keine relevanten Folgekosten zu erwarten.

Im Fall der Projektionsfläche sind mögliche Verbesserungen dagegen nicht einfach zu integrieren. Ein Ansatz könnte hier die Verringerung der sonstigen Nutzlast zu Gunsten eines größeren Projektionsfeldes und damit ggf. verbunden zusätzlicher und/oder leistungsfähigerer Projektoren sein. Da die Projektionsfläche jedoch integraler Bestandteil der Cockpitkonstruktion ist, würde eine vergrößerte Projektionsfläche eine Neuentwicklung der Gondel nach sich ziehen.

Alternativ könnte man auf Methoden der Virtuellen Realität zurückgegriffen werden, und zum Beispiel mit einer VR-Brille ein virtuelles Cockpit simuliert werden. Die technischen Herausforderungen und Kosten (Head-tracking, Integration eines Datenanzuges zur virtuellen Darstellung des Fahrers) sind im Vergleich mit einer Gondelneukonstruktion durch Kaufkomponenten beherrschbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Bericht wird anhand von typischen Fahrmanövern zur Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen die Eignung des Robotic Motion Simulators (RMS) untersucht. Zunächst wird hierzu eine Vorgehensweise definiert. Diese lehnt sich stark an das Vorgehen bei der Beurteilung von Flugsimulatoren an, welche durch das Dokument ICAO 9625 beschrieben wird. Das Vorgehen beinhaltet zunächst die Definition von Bewertungskriterien. Diese werden durch Bewertungsmaßstäbe unterlegt. Anhand der Bewertungskriterien werden die Systemeigenschaften des RMS bewertet. Darüber hinaus dienen die Bewertungskriterien zur Ermittlung von Anforderungen an den RMS für ausgewählte Tests, die im Verlauf des Projektes als Nachweisverfahren für die Erreichung der übergeordneten Projektziele als besonders relevant betrachtet werden. Der Vergleich der Systemeigenschaften mit den Anforderungen aus den Nachweisverfahren dient als Grundlage für die Eignungsbewertung des RMS im Rahmen dieses Projektes.

Es wurden für die erste Bewertung drei praxisnahe Fahrszenarien ausgewählt. Dabei handelt es sich um ein doppeltes Spurwechselmanöver bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten sowie ein Szenario zur Vermeidung von Auffahrunfällen mittels einer Fahrerassistenzfunktion. Zusammenfassend wird der RMS für alle Manöver als geeignet bewertet. Auffälligstes Ergebnis ist, dass im Bereich der Bewegungssimulation die Fähigkeiten mit Blick auf die Seatshakeranlage die Anforderungen seitens der Tests übersteigt. Dagegen sind im Bereich der Sichtsimation Defizite identifiziert worden. Soweit diese durch Einsatz erweiterter Datenbanken oder extern positionierter Rechnerhardware zu beheben sind, ist dies grundsätzlich unabhängig voneinander zu betrachten. Maßnahmen im Bereich der Projektionstechnik dagegen sind nur mit erhöhtem Gewicht realisierbar. Auf Grund der beschränkten maximalen Nutzlast sind Gewichtseinsparungen an anderer Stelle notwendig. In diesem Fall führt jede nicht benötigte Komponente zu einer Einschränkung des Verbesserungspotenzials.

Es wurden Vorschläge zur weiteren Verbesserung der Simulationsgüte im Hinblick auf die anstehenden Evaluierungen gemacht. Hierbei wurden in keiner Weise vorhandene Ressourcen betrachtet. Es handelt sich vielmehr um eine rein technische Betrachtungsweise. Diese lauten zusammengefasst:

- Erweiterung des Sichtfeldes durch größere Projektionsfläche durch Neukonstruktion der Gondel oder Einsatz einer VR-Brille
- Erhöhung der Qualität der Bildwiedergabe durch
 - höher auflösende bzw. zusätzliche Projektoren
 - modernisierte Datenbasis mit der Möglichkeit, weitere Verkehrsteilnehmer darzustellen
 - modernisierte Rechnerarchitektur zur Erhöhung der Bildqualität

Im folgenden Arbeitspaket wird nun explizit für das Bewegungssystem des RMS der Einfluss der von parallelen Roboterstrukturen abweichenden Bauform untersucht. Hierzu wird das Bewegungsverhalten vermessen und seine Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Bewertungskriterien nachgewiesen.

8 Anhang

8.1 Literaturverzeichnis

- [1] DLR institut für Verkehrssystemtechnik, „http://www.dlr.de/fs/desktopdefault.aspx/tabid-1236/1690_read-3257/,“ Braunschweig, 2013.
- [2] M. F. F. Bruzelius, „Driving Simulation at VTI,“ ICT Conference 2010 Brussels, 2010.
- [3] Daimler AG, „http://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid#Geregeltes_Schweben,“ [Online]. [Zugriff am 29 08 2013].
- [4] Daimler AG, „<http://www.daimler.com/dccom/0-5-1418703-49-1338848-1-0-0-0-0-0-7751-7165-0-0-0-0-0-0-0.html>,“ [Online]. [Zugriff am 23 08 2013].
- [5] DLR Institut für Robotik und Mechatronik, „<http://www.dlr.de/rm/de/desktopdefault.aspx/tabid-8181/>,“ [Online]. [Zugriff am 16 08 2013].
- [6] L. Nilsson, „Driving Simulators in Product Development and Assessment,“ Presentation at ICAP 2010, Melbourne, 2010.
- [7] VTI, „<http://www.vti.se/>,“ [Online]. Available: <http://www.vti.se/>. [Zugriff am 16 08 2013].
- [8] TNO, „<http://www.desdemona.eu/desdemona.html>,“ [Online]. Available: <http://www.desdemona.eu/desdemona.html>. [Zugriff am 16 08 2013].
- [9] M. W. P. F. M. Roza, „Performance Testing of the Desdemona Motion System,“ AIAA Modelling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 20.-23.08.2007, 2007.
- [10] AMST, „http://www.amst-germany.de/publics/desdemona_pub.htm,“ [Online]. Available: http://www.amst-germany.de/publics/desdemona_pub.htm. [Zugriff am 19 08 2013].
- [11] A. Gferrer, Vorlesungsmanuskript Kinematik und Robotik, Graz: Institut für Geometrie der TU Graz, 2008.
- [12] International Civil Aviation Organization, Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices, 3 ed., vol. I, ICAO, Ed., Montreal, Canada, 2009.
- [13] C. Seehof, „Konzeptioneller Vergleich von Hexapod- und Roboterarmsystemen für die Eignung in der Fahrsimulation,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Braunschweig, 2013.

8.2 Anforderungen durch den Versuch „Doppelter Spurwechsel“

Nr.	Kriterium	Anf.	Anmerkung
1.1	Arbeitsbereich/Beschleunigung (rot)	3	max. Gierwinkel 12°, andere kleiner
1.2	Arbeitsbereich/Beschleunigung (trans)	3	max. 5m/s ² lateral
1.3	Frequenzband (Phasengang)	3	s. Diagramme
1.4	Frequenzband (Amplitudengang)	3	s. Diagramme
1.5	Beschleunigungsrichtung und -amplitude	3	
2.1	Anforderung Motion Cueing	1	nach Möglichkeit nicht aktiv, da ohne Skalierung fahrbar
3.1	Frequenzband Seatshaker	0	
3.2	Force Feedback	3	Sidestick
4.1	Realitätsnähe	2	
4.2	Flexibilität (Hardware)	1	Sidestick muss vorhanden sein
4.3	Flexibilität (Software)	2	Parametrierung für Sidestick
4.4	Ergonomie (Cockpit)	2	Rel. Positionen wie im ROMO
5.1	Sichtfeld (horizontal)	2	Pylone der Nebenspur sichtbar
5.2	Sichtfeld (vertikal)	1	Ähnlich ROMO
5.3	Sichtabstand	2	100m
5.4	Helligkeit	2	
5.5	Edgeblending/Farbtreue	1	
5.6	Auflösung	2	
5.7	Bildwiederholrate / -synchronisation / Konstanz	3	
5.8	Simulationsqualität atmosphärischer Effekte	2	
5.9	Parallaxeffekte / Stereo / Headtracker	1	
5.10	Bildqualität	2	
5.11	Reaktionszeit/Zeitverzug	3	
5.12	Realitätsgrad / Detailgrad der Szenerie	1	

Nr.	Kriterium	Anf.	Anmerkung
6.1	Verkehr	0	
6.2	Personen	0	
6.3	Umfang der Szeneriedatenbank	1	
6.4	Detaillierungsgrad der Strecke	2	Freifläche mit Pylonen, Objekte für Orientierung
6.5	Adaptionsmöglichkeit des Szenarios	1	
7.1	Störgeräusche / Geräuschdämmung	2	
7.2	Betriebsgeräusche des simulierten Fahrzeugs	2	Geschwindigkeitsabhängigkeit
7.3	Umgebungsgeräusche	1	
7.4	Dynamische Soundeffekte	1	Überfahren eines Pylons darstellbar
7.5	Interne und externe Quellen	2	
7.6	Surround Sound	1	
8.1	Validierung	1	
8.2	Modellierungstiefe/Vollständigkeit	2	So nah wie möglich an ROMO insbes. Sidestick
8.3	Validität des Modells	2	
9.1	Kooperative Nutzung	0	
9.2	Evaluierungsmöglichkeiten (Kameraaufzeichnung, Stimmenaufzeichnung, Telemetrieauswertung)	3	Fahrdynamikzustände, Kamera für Arm-Sidestick-Interaktion
9.3	Ergonomie (Einstieg)	1	
9.4	Sicherheit (Zugelassenes Personal)	1	
9.5	Festinstallation notwendig / Transportabler Simulator	0	
9.6	Gemeinsames Testprotokoll / Testumgebung / Auswertungsformular für Personentests	1	
9.7	Vordefinierte Testtrajektorien ISO Norm (Automotive)	3	Doppelter Spur-wechsel ISO 3888-1
9.8	Evaluierung mit Berücksichtigung eines Wahrnehmungsmodell	2	

Tab. 1: Anforderungen an einen Fahrsimulator durch den Versuch „Doppeltes Spurwechselmanöver“

8.3 Bewertung der Systemeigenschaften RMS

8.3.1 Bewertung „Doppelter Spurwechsel“

Nr.	Kriterium	Teilversuch 1 65 km/h	Teilversuch 2 30 km/h
1.1	Arbeitsbereich/Beschleunigung (rot)	3	3
1.2	Arbeitsbereich/Beschleunigung (trans)	2	3
1.3	Frequenzband (Phasengang)	2	3
1.4	Frequenzband (Amplitudengang)	2	3
1.5	Beschleunigungsrichtung und -amplitude	2	3
2.1	Anforderung Motion Cueing	2	2
3.1	Frequenzband Seatshaker	2	2
3.2	Force Feedback	3	3
4.1	Realitätsnähe	2	2
4.2	Flexibilität (Hardware)	3	3
4.3	Flexibilität (Software)	3	3
4.4	Ergonomie (Cockpit)	2	2
5.1	Sichtfeld (horizontal)	2	2
5.2	Sichtfeld (vertikal)	2	2
5.3	Sichtabstand	2	2
5.4	Helligkeit	2	2
5.5	Edgeblending/Farbtreue	1	1
5.6	Auflösung	2	2
5.7	Bildwiederholrate / -synchronisation / Konstanz	3	3
5.8	Simulationsqualität atmosphärischer Effekte	2	2
5.9	Paralaxeffekte / Stereo / Headtracker	0	0
5.10	Bildqualität	2	2
5.11	Reaktionszeit/Zeitverzug	2	2
5.12	Realitätsgrad / Detailgrad der Szenerie	1	1

Nr.	Kriterium	Teilversuch 1 65 km/h	Teilversuch 2 30 km/h
6.1	Verkehr	0	0
6.2	Personen	0	0
6.3	Umfang der Szeneriedatenbank	1	1
6.4	Detailierungsgrad der Strecke	2	2
6.5	Adaptionsmöglichkeit des Szenarios	1	1
7.1	Störgeräusche / Geräuschdämmung	2	2
7.2	Betriebsgeräusche des simulierten Fahrzeugs	2	2
7.3	Umgebungsgeräusche	1	1
7.4	Dynamische Soundeffekte	1	1
7.5	Interne und externe Quellen	2	2
7.6	Surround Sound	2	2
8.1	Validierung	2	2
8.2	Modellierungstiefe/Vollständigkeit	3	3
8.3	Validität des Modells	3	3
9.1	Kooperative Nutzung	0	0
9.2	Evaluierungsmöglichkeiten (Kameraaufzeichnung, Stimmenaufzeichnung, Telemetrieauswertung)	3	3
9.3	Ergonomie (Einstieg)	2	2
9.4	Sicherheit (Zugelassenes Personal)	1	1
9.5	Festinstallation notwendig / Transportabler Simulator	0	0
9.6	Gemeinsames Testprotokoll / Testumgebung / Auswertungsformular für Personentests	1	1
9.7	Vordefinierte Testtrajektorien ISO Norm (Automotive)	3	3
9.8	Evaluierung mit Berücksichtigung eines Wahrnehmungsmodell	2	2

Tab. 2: Bewertung der Systemeigenschaften des RMS für den Versuch „Doppeltes Spurwechselmanöver“

8.3.2 Bewertung "Abstandsassistent"

Nr.	Kriterium	Versuch UC 01 401
1.1	Arbeitsbereich/Beschleunigung (rot)	1
1.2	Arbeitsbereich/Beschleunigung (trans)	2
1.3	Frequenzband (Phasengang)	2
1.4	Frequenzband (Amplitudengang)	3
1.5	Beschleunigungsrichtung und -amplitude	3
2.1	Anforderung Motion Cueing	1
3.1	Frequenzband Seatshaker	0
3.2	Force Feedback	2
4.1	Realitätsnähe	2
4.2	Flexibilität (Hardware)	1
4.3	Flexibilität (Software)	2
4.4	Ergonomie (Cockpit)	2
5.1	Sichtfeld (horizontal)	3
5.2	Sichtfeld (vertikal)	3
5.3	Sichtabstand	3
5.4	Helligkeit	2
5.5	Edgeblending/Farbtreue	2
5.6	Auflösung	2
5.7	Bildwiederholrate / -synchronisation / Konstanz	3
5.8	Simulationsqualität atmosphärischer Effekte	1
5.9	Paralaxeffekte / Stereo / Headtracker	0
5.10	Bildqualität	2
5.11	Reaktionszeit/Zeitverzug	3
5.12	Realitätsgrad / Detailgrad der Szenerie	1

Nr.	Kriterium	Versuch UC 01 401
6.1	Verkehr	3
6.2	Personen	0
6.3	Umfang der Szeneriedatenbank	2
6.4	Detailierungsgrad der Strecke	2
6.5	Adaptionsmöglichkeit des Szenarios	2
7.1	Störgeräusche / Geräuschkämmung	2
7.2	Betriebsgeräusche des simulierten Fahrzeugs	2
7.3	Umgebungsgeräusche	2
7.4	Dynamische Soundeffekte	0
7.5	Interne und externe Quellen	3
7.6	Surround Sound	1
8.1	Validierung	0
8.2	Modellierungstiefe/Vollständigkeit	1
8.3	Validität des Modells	2
9.1	Kooperative Nutzung	0
9.2	Evaluierungsmöglichkeiten (Kameraaufzeichnung, Stimmenaufzeichnung, Telemetrieauswertung)	3
9.3	Ergonomie (Einstieg)	1
9.4	Sicherheit (Zugelassenes Personal)	1
9.5	Festinstallation notwendig / Transportabler Simulator	1
9.6	Gemeinsames Testprotokoll / Testumgebung / Auswertungsförmular für Personentests	0
9.7	Vordefinierte Testtrajektorien ISO Norm (Automotive)	0
9.8	Evaluierung mit Berücksichtigung eines Wahrnehmungsmodell	0

Tab. 3: Bewertung der Systemeigenschaften des RMS für den Versuch „Abstandsassistent zur Vermeidung von Auffahrunfällen“

8.4 Testbeschreibung UC 01 401: Vermeidung von Auffahrunfällen infolge von Geschwindigkeitsunterschieden