

Dissertation zur Erlangung des
akademischen Grades Doctor philosophiae (Dr. phil.)

**Eine Mixed-Methods-Untersuchung
zur Display Fidelity von
immersiven virtuellen Fahrzeugprototypen.**

vorgelegt der
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften und Medien
der Technischen Universität Ilmenau

von
Konstantin Wall

1. Gutachterin: Univ.-Prof. Dr. phil. habil. Nicola Döring
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Raake
3. Gutachterin: Univ.-Prof. Dr. phil. habil. Nicole Krämer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20.12.2018

Disclaimer

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen.

Danksagungen

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Prof. Dr. Nicola Döring sowie Frau Dr. Sandra Pöschl für die erstklassige Betreuung dieser Arbeit und die Durchführung der Doktorandenkolloquien.

Großen Dank möchte ich auch allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Kolloquien für ihre kritischen und motivierenden Anregungen sowie für inspirierende und spannende fachübergreifende Diskussionen aussprechen.

Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen und den Doktoranden bei Volkswagen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützten und all den Versuchspersonen, die an den Untersuchungen teilnahmen.

Des Weiteren danke ich den lieben Menschen, die mich beim Lektorat der Arbeit unterstützt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Freund Wilm für seine grenzenlose Hilfsbereitschaft und Unterstützung und all die Momente, in denen wir zusammen Tränen lachten.

Ich danke meiner lieben Familie und meiner wunderbaren Frau Maike für die schier endlose Unterstützung und all den Freunden, die mitgefiebert haben.

Zuletzt danke ich meiner Großmutter Maria für ihre Herzlichkeit und einen inspirierenden selbstlosen Optimismus gegenüber dieser Welt.

Inhaltsübersicht

Abstract	VI
Zusammenfassung	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	X
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen.....	4
3 Vorstudie: Barrieren für den praktischen Einsatz von virtuellen immersiven Fahrzeugprototypen.....	31
4 Quasi-experimentelle Laboruntersuchung: Einfluss der Display Fidelity auf die Beurteilungsergebnisse eines Fahrzeuginnenraums	58
5 Quasi-experimentelle Laboruntersuchung: Steigerung der Display Fidelity von virtuellen Prototypen durch vibrotaktilen Feedback.....	98
6 Fazit der Arbeit und Ausblick.....	162
7 Literaturverzeichnis.....	165
Anhang.	IX

Inhaltsverzeichnis

Abstract	VI
Zusammenfassung	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen	4
2.1 Immersive virtuelle Umgebungen	4
2.1.1 Display Fidelity – Die objektive Abbildungstreue des VR-Systems	5
2.1.2 Presence – Der subjektive Eindruck in einer immersiven virtuellen Umgebung	6
2.1.3 Task Performance	6
2.1.4 Cybersickness	7
2.2 Darstellungssysteme für immersive virtuelle Umgebungen	9
2.2.1 Head-Mounted-Display-basierte Systeme	11
2.2.2 Immersive projektionsbasierte Systeme	13
2.2.3 Einfluss der Displaytechnik auf die Raumwahrnehmung.....	15
2.2.3.1 Visuelle Raum- und Tiefenwahrnehmung des Menschen.....	15
2.2.3.2 Mono- und binokulare Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung.....	18
2.2.3.3 Okulomotorische Reize zur Tiefenwahrnehmung	19
2.2.3.4 Okulomotorische Besonderheiten von HMD-basierten Systemen	19
2.2.3.5 Okulomotorische Besonderheiten von projektionsbasierten Systemen ..	22
2.2.3.6 Systemübergreifende Hürden der visuellen Reizsimulation	22
2.2.3.7 Diskussion	24
2.2.4 Darstellungssystem „Virtuelle Sitzkiste“.....	25
3 Vorstudie: Barrieren für den praktischen Einsatz von virtuellen immersiven Fahrzeugprototypen	31
3.1 Begriffsdefinitionen	31
3.1.1 Virtuelle Prototypen.....	32
3.1.2 Physische Prototypen.....	32
3.1.3 Absicherung von Produkteigenschaften	33
3.1.4 Akteure und deren Rollen	34
3.2 Forschungsfragen	36
3.3 Methode	37
3.3.1 Design	37
3.3.2 Konstruktion des Interviewleitfadens	38
3.3.2.1 Virtuelle Sitzkiste als Bewertungswerkzeug	38
3.3.2.2 Immersive Darstellung eines virtuellen Fahrzeugs.....	39

3.3.2.3	Subjektives Erleben von realen Fahrzeugen.....	40
3.3.3	Apparatur und Stimulusmaterial.....	41
3.3.4	Rekrutierung.....	42
3.3.5	Stichprobe	42
3.3.6	Untersuchungsdurchführung	43
3.3.6.1	Begrüßung und Aufklärung der Teilnehmenden	44
3.3.6.2	Durchführung des Leitfadeninterviews.....	44
3.3.6.3	Abschlussgespräch	44
3.3.7	Datenanalyse	45
3.4	Ergebnisse und Diskussion	45
3.4.1	Eingeschränktes Vertrauen in die Ergebnisse der virtuellen Fahrzeugbeurteilung	45
3.4.2	Keine haptischen Eindrücke im virtuellen Fahrzeug.....	46
3.4.3	Durch virtuelle Innenraumbeurteilung verursachte Cybersickness- Symptome	47
3.4.4	Einschränkung der Fahrzeugbeurteilung durch die Verwendung eines Head-Mounted-Display.....	48
3.4.5	Selbstverständnis von Fahrzeugexperten bei einer “Beurteilung aus Kundensicht”	51
3.4.6	Falsche Beurteilungsperspektive aufgrund falscher Sitzposition.....	52
3.4.7	Inkonsistente Framerate durch unzureichende Systemleistung oder zu komplexe Daten.....	53
3.4.8	Methodische Einschränkungen.....	55
3.4.9	Fazit und Ausblick.....	56
4	Quasi-experimentelle Laboruntersuchung: Einfluss der Display Fidelity auf die Beurteilungsergebnisse eines Fahrzeuginnenraums..	58
4.1	Begriffsdefinitionen	60
4.1.1	Beurteilung der Erreichbarkeit von Bedienelementen.....	60
4.1.2	Beurteilung der Sicht nach außen.....	63
4.1.3	Beurteilung des Raumgefühls im Fahrzeuginnenraum.....	65
4.2	Forschungshypothesen	66
4.2.1	Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps führt zur abweichenden Beurteilung der Erreichbarkeit von Bedienelementen.....	67
4.2.2	Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps führt zur abweichenden Beurteilung der Sicht nach außen.....	67
4.2.3	Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps führt zur abweichenden Beurteilung des Raumgefühls	68
4.2.4	Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps verursacht Cybersickness	68
4.3	Methode.....	69
4.3.1	Design	69
4.3.2	Versuchsapparatur und Operationalisierung der unabhängigen Variablen.....	70

4.3.3	Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung der abhängigen Variablen.....	72
4.3.3.1	Fragebogenkonstruktion.....	72
4.3.3.2	Operationalisierung der abhängigen Variablen.....	75
4.3.4	Rekrutierung.....	77
4.3.5	Stichprobe.....	78
4.3.6	Untersuchungsdurchführung.....	80
4.3.6.1	Begrüßung und Aufklärung der Teilnehmenden.....	82
4.3.6.2	Einweisung in die Innenraumdarstellung.....	82
4.3.6.3	Simulierte Innenraumbeurteilung.....	83
4.3.6.4	Beurteilung der Innenraumdarstellung.....	83
4.3.6.5	Abschlussgespräch und Übergabe der Incentives.....	84
4.3.7	Datenanalyse.....	84
4.3.7.1	Eingabe und Bereinigung der Daten.....	84
4.3.7.2	Statistische Auswertung.....	85
4.4	Ergebnisse.....	86
4.4.1	Einfluss der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung von Erreichbarkeiten.....	86
4.4.2	Einfluss der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung der Sicht nach außen.....	87
4.4.3	Einfluss der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung des Raumgefühls.....	88
4.4.4	Nach virtueller Innenraumbeurteilung gemessene Cybersickness.....	89
4.4.5	Nebenbefund: Durch virtuelle Innenraumbeurteilung erzeugte Presence.....	90
4.5	Diskussion.....	91
4.5.1	Beurteilung von Erreichbarkeiten in der virtuellen Sitzkiste.....	91
4.5.2	Beurteilung der Sicht nach außen in der virtuellen Sitzkiste.....	92
4.5.3	Beurteilung des Raumgefühls in der virtuellen Sitzkiste.....	92
4.5.4	Durch virtuelle Innenraumbeurteilung verursachte Cybersickness.....	93
4.5.5	Methodische Einschränkungen.....	94
4.5.6	Fazit und Ausblick.....	95
5	Quasi-experimentelle Laboruntersuchung: Steigerung der Display Fidelity von virtuellen Prototypen durch vibrotaktilen Feedback.....	98
5.1	Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen.....	100
5.1.1	Haptisches Rendern.....	100
5.1.2	Haptische Wahrnehmung.....	102
5.1.3	Haptische Feedback-Devices.....	103
5.1.4	Haptische Absicherungsaspekte in Fahrzeuginnenräumen.....	106
5.1.5	Kollisionserkennung und -verarbeitung.....	108
5.2	Forschungshypothesen.....	113
5.2.1	Einfluss der Kollisionsrückmeldung auf die Effizienz der Beurteilungsaufgabe.....	113

5.2.2	Einfluss der Kollisionsrückmeldung auf die empfundene Realitätsnähe der Simulationsumgebung.....	113
5.2.3	Eignung des vibrotaktilen Kollisionsfeedbacks für die Beurteilung haptischer Eigenschaften.....	114
5.3	Methode.....	114
5.3.1	Design	114
5.3.2	Versuchsapparatur und Operationalisierung der unabhängigen Variablen.....	115
5.3.2.1	Versuchsapparatur.....	116
5.3.2.2	Hardwareseitige Implementierung der vibrotaktilen Kollisionsrückmeldung	116
5.3.2.3	Softwareseitige Implementierung der vibrotaktilen Kollisionsrückmeldung	118
5.3.2.4	Stimulusmaterial	122
5.3.2.5	Operationalisierung der unabhängigen Variablen	125
5.3.3	Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung der abhängigen Variablen.....	126
5.3.3.1	Fragebogenkonstruktion.....	127
5.3.3.2	Operationalisierung der abhängigen Variablen	129
5.3.4	Rekrutierung.....	131
5.3.5	Stichprobe	132
5.3.6	Untersuchungsdurchführung	134
5.3.6.1	Begrüßung und Einweisung	136
5.3.6.2	Ausrüstung und Einweisung der Teilnehmer in das VR-System	137
5.3.6.3	Durchführung der Übungsaufgaben zur Kollisionsrückmeldung.....	139
5.3.6.4	Simulierte Innenraumabsicherung	140
5.3.6.5	Post VR-Befragungsblock	141
5.3.6.6	Abschlussgespräch, Incentive-Übergabe, Verabschiedung.....	142
5.3.7	Datenanalyse	142
5.4	Ergebnisse	143
5.4.1	Effizienz der Aufgabenerfüllung nach Art des Kollisionsfeedbacks	143
5.4.2	Empfundene Realitätsnähe nach Art des Kollisionsfeedbacks	146
5.4.3	Eignung der verschiedenen Methoden des Kollisionsfeedbacks für Bewertung haptischer Eigenschaften.....	146
5.4.4	Nebenbefund: Nach virtueller Innenraumbeurteilung gemessene Cybersickness.....	147
5.4.5	Nebenbefund: Nach virtueller Innenraumbeurteilung gemessene Presence	148
5.5	Diskussion	149
5.5.1	Einfluss von vibrotaktilen Feedback auf die Effizienz einer virtuellen Innenraumbeurteilung.....	149
5.5.2	Einfluss von vibrotaktilen Feedback auf die empfundene Realitätsnähe	151

5.5.3	Eignung von vibrotaktilen Feedback für die Bewertung haptischer Eigenschaften	153
5.5.4	Nebenbefund: Durch virtuelle Innenraumbeurteilung verursachte Cybersickness	157
5.5.5	Nebenbefund: Durch virtuelle Innenraumbeurteilung erzeugte Presence	158
5.5.6	Methodische Einschränkungen.....	158
5.5.7	Fazit und Ausblick.....	159
6	Fazit der Arbeit und Ausblick.....	162
7	Literaturverzeichnis	165
Anhang	IX
A	Übersetzte und angepasste Version des Slater-Usch-Steed-Questionnaire.....	X
B	Übersetzte Version des Simulator-Sickness-Questionnaire.....	XI
C	Studie 1 – Standardisierte Einweisung der Interviewteilnehmer	XII
D	Studie 2	XIII
D.1	Standardisierte Einweisung der Teilnehmer in den Versuchsablauf	XIII
D.2	Index Erreichbarkeit von Bedienelementen	XIV
D.3	Index Sicht nach außen	XV
D.4	Index Raumgefühl	XVI
E	Studie 3	XVII
E.1	Standardisierte Einweisung der Teilnehmer in den Versuchsablauf	XVII
E.2	Standardisierte Einweisung der Teilnehmer in die Versuchsanordnung	XVIII
E.3	Index Realitätsnähe.....	XIX
E.4	Index Eignung für haptische Bewertung.....	XX

Abstract

The thesis presented deals with the validation of immersive virtual vehicle prototypes in a mixed-methods-approach under practical conditions. Product validation by the means of immersive virtual prototypes is a promising method for reducing physical prototypes and costs in the development process. For this purpose, digital vehicle prototypes are generated from existing design data so that product features can be assessed by the means of an immersive virtual reality (VR) system. However, the reliability of such validation results has not been sufficiently researched. For that, *Display Fidelity* (Bowman & McMahan, 2007) plays a central role. It is the degree to which a simulator accurately reproduces sensory stimuli (Gerathewohl, 1969). The studies were conducted using a VR system *Virtual Seating Buck* in the technical development of Volkswagen AG in Wolfsburg.

In a preliminary qualitative study with $N = 12$ vehicle experts ($M_{Age} = 37.92$ years, $SD = 9.26$) the aspects of display fidelity relevant to virtual validation were identified from the user's perspective (Wall, Tomaszek-Staude, Pöschl & Döring, 2014). The participants were recruited after finishing a validation in the virtual seating buck and asked to report their impressions and experiences in a semi-structured interview. Among the findings with the greatest potential impact on virtual validation was the fear of participants to come to different results in the virtual vs. physical prototype. Furthermore, they missed haptic feedback in the evaluation of various validation tasks in the *virtual seating buck*. Also, various symptoms regarding cybersickness were reported. The findings served to generate hypotheses for two quantitative follow-up studies.

The second study examined if the product features in a virtual car interior could be assessed as reliable as inside a physical one. Herefore, a quasi-experimental laboratory study was carried out with three experimental groups (between-subject) consisting of $N = 96$ automotive experts (access panel of Research and Development). The subjects ($Mdn_{Age} = 41\text{--}45$ years, 26% women) assessed a car interior under practical conditions by means of a questionnaire. The *Display Fidelity of Car Interior* (IV) was varied on three levels of car interior display (concept vehicle, hardware mock up and virtual seating buck). ANOVA was used to check whether the virtual car interior leads to deviating assessment results of the *Reachability of Operating Elements* (H1), the *Outward View* (H2) and the *Sense of Space* (H3). These

are three assessments frequently performed in the early stages of car development. In addition, it was examined whether and how much the virtual representation caused *Cybersickness Symptoms* (H4). To operationalize the dependent variables *Reachability of Operating Elements* (DV1), *Outward View* (DV2) and *Sense of Space* (DV3), indices were calculated from questionnaire items. The operationalization of *Cybersickness* was performed by the means of the *Simulator Sickness Questionnaire* (Kennedy, Lane, Berbaum & Lienthal, 1993). As for the reachability assessment (H1) and the outward view assessment (H2) the results demonstrated no statistically significant differences in the virtual seating buck condition. The assessment of the sense of space (H3) led to a significant difference ($\eta^2 = .166$) in the virtual compared to the physical prototypes. As a result of using the virtual seating buck a significant increase in cybersickness (H4) was found ($d = 0.64$).

The third study examined whether the use of vibrotactile feedback increases the efficiency of the virtual validation and results in a more realistic impression of the virtual vehicle. Using a prototypical solution developed in the scope of this work, two vibrotactile bracelets were integrated into the virtual seating buck. The quasi-experimental laboratory study was carried out with three groups (between-subject) of $N = 87$ automotive experts (access panel of Research and Development). The subjects ($M_{Age} = 37.17$ years, $SD = 8.06$, 31% women) assessed a car interior under practical conditions by means of a questionnaire. ANOVA was used to test whether the *Efficiency of the Assessment* (H1), the *Perceived Realism* (H2) and the *Suitability for Haptic Assessment* (H3) were higher in the virtual vehicle interior with vibrotactile feedback than in the visual one. The *Display Fidelity of the Collision Feedback* (IV) was varied on three levels (visual, vibrotactile, combined). Regarding the efficiency, the dependent variables (DV) *Number of Collisions during Interior Assessment* (DV1a) and *Assessment Duration* (DV1b) were logged by the system. The *Perceived Realism* (DV2) and *Suitability for Haptic Assessment* (DV3) variables were calculated as indices from questionnaire items. As for the efficiency (H1), the results showed an efficiency-enhancing decrease of the measured collisions when using vibrotactile feedback ($\eta^2 = .230$). However, it was found that without additional visualization of the vibrotactile devices, the assessment duration increased significantly compared to the other experimental conditions ($\eta^2 = .154$). No significant effects of the vibrotactile feedback prototype on perceived realism (H2) and suitability for haptic assessment (H3) were found.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht in einem Mixed-Methods-Ansatz unter praxisnahen Bedingungen die *virtuelle Absicherung* von Produkteigenschaften in *immersiven virtuellen Fahrzeugprototypen*. Die virtuelle Absicherung ist eine vielversprechende Methode zur Reduzierung physischer Prototypen und Kosten im Entwicklungsprozess. Hierzu werden vorhandene Konstruktionsdaten zu virtuellen Modellen aufbereitet und daran Produkteigenschaften in einer frühen Entwicklungsphase beurteilt. Die Zuverlässigkeit solcher Beurteilungsergebnisse ist bislang nicht ausreichend erforscht. Die objektive Abbildungstreue *Display Fidelity* (Bowman & McMahan, 2007) spielt hierbei eine zentrale Rolle. Es handelt sich um die Exaktheit, mit der ein System Sinnesreize reproduzieren kann (Gerathewohl, 1969). Die Durchführung der Studien erfolgte an einem Virtual-Reality-System *virtuelle Sitzkiste* in der Technischen Entwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg.

In einer qualitativen Vorstudie mit $N = 12$ Fahrzeugexperten ($M_{\text{Alter}} = 37.92$ Jahre, $SD = 9.26$) wurden die für die virtuelle Absicherung relevanten Aspekte der *Display Fidelity* aus Nutzersicht identifiziert (Wall et al., 2014). Im Anschluss an eine Beurteilung in der virtuellen Sitzkiste wurden die Experten gebeten, in einem Leitfadenterview ihre Eindrücke und Erfahrungen zu berichten. Die wörtlichen Transskripte wurden nach Mayring (2010) ausgewertet. Zu den Befunden mit dem größten potentiellen Einfluss auf die Absicherung gehörte zum einen die Befürchtung der Befragten, zu abweichenden Ergebnissen im virtuellen gegenüber dem physischen Prototyp zu kommen. Zum anderen vermissten sie haptisches Feedback bei der Beurteilung diverser Eigenschaften in der virtuellen Sitzkiste. Auch wurden diverse Symptome berichtet, die auf *Cybersickness* deuteten. Diese Befunde dienten der Hypothesenbildung zweier quantitativer Folgestudien.

Die zweite Studie prüfte, ob Eigenschaften im virtuellen Fahrzeuginnenraum ebenso zuverlässig beurteilt werden können wie in einem physischen. Hierzu wurde eine quasi-experimentelle Laboruntersuchung mit drei Versuchsgruppen (*Between-Subject*) bestehend aus $N = 96$ Sachverständigen (Access-Panel der Forschung und Entwicklung) durchgeführt. Die Versuchspersonen ($Mdn_{\text{Alter}} = 41\text{--}45$ Jahre, 26% Frauen) beurteilten praxisnah in einer virtuellen Absicherung mittels Fragebogen einen Fahrzeuginnenraum. Die *Display Fidelity des Fahrzeuginnenraums* (UV) wurde dreifach gestuft (*Konzeptfahrzeug*, *Hardware-Mock-Up*, *virtuelle Sitzkiste*). Mittels ANOVA wurde geprüft, ob die virtuelle Innenraumdarstellung zu abweichenden Beurteilungsergebnissen der *Erreichbarkeit von Bedienelementen* (H1), der *Sicht nach außen* (H2) und des *Raumgefühls* (H3) führe. Hierbei handelt es sich

um drei in der frühen Entwicklungsphase oft durchgeführte Beurteilungen. Zudem wurde überprüft, ob und wie stark die Beurteilung des virtuellen Prototypen in der virtuellen Sitzkiste *Cybersickness-Symptome* hervorruft (H4). Zur Operationalisierung der abhängigen Variablen *Erreichbarkeit von Bedienelementen* (AV1), *Sicht nach außen* (AV2) und *Raumgefühl* (AV3) wurden Indizes aus Items des Fragebogens gebildet. Die Operationalisierung von *Cybersickness* erfolgte mit dem *Simulator-Sickness-Questionnaire* (Kennedy et al., 1993). Hypothesenkonträr zeigte sich kein Unterschied der Erreichbarkeitsbeurteilung (H1) oder der Sichtbeurteilung (H2) in der virtuellen Sitzkiste. Die Beurteilung des Raumgefühls (H3) führte hypothesenkonform zu einem signifikanten Unterschied ($\eta^2 = .166$) gegenüber den physischen Prototypen. Infolge der Nutzung der virtuellen Sitzkiste wurde ein signifikanter Anstieg von *Cybersickness-Symptomen* (H4) festgestellt ($d = 0.64$).

Die dritte Studie prüfte, ob der Einsatz von vibrotaktilen Feedback die Effizienz der Absicherung steigert und zu einem realistischeren Eindruck des virtuellen Fahrzeugs führt. Mittels einer im Rahmen der Arbeit entwickelten prototypischen Lösung wurden zwei vibrotaktile Armbänder in die *virtuelle Sitzkiste* integriert. Die quasi-experimentelle Laboruntersuchung erfolgte mit drei Gruppen (*Between-Subject*) von $N = 87$ Sachverständigen (Access-Panel der Forschung und Entwicklung). Die Teilnehmenden ($M_{\text{Alter}} = 37.17$ Jahre, $SD = 8.06$, 31% Frauen) führten eine praxisnahe virtuelle Absicherung durch. Mittels ANOVA wurde geprüft, ob die *Effizienz der Beurteilung* (H1), die *empfundene Realitätsnähe* (H2) sowie die *Eignung für haptische Bewertung* (H3) im virtuellen Fahrzeuginnenraum mit vibrotaktilen Feedback höher sei als mit visuellem. Die *Display Fidelity des Kollisionsfeedbacks* (UV) wurde dreifach gestuft (visuell, vibrotaktile, kombiniert). Die effizienzbezogenen abhängigen Variablen *Anzahl von Kollisionen während der Innenraumbewertung* (AV1a) und *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* (AV1b) wurden systemseitig protokolliert. Die Variablen zur *Realitätsnähe* (AV2) und *Eignung für haptische Bewertung* (AV3) wurden als Indizes aus den Fragebogenitems gebildet. Hinsichtlich der Effizienz (H1) zeigten die Ergebnisse einen effizienzsteigernden Rückgang der gemessenen Kollisionen bei Nutzung von vibrotaktilen Feedback ($\eta^2 = .230$). Gleichzeitig jedoch wurde festgestellt, dass ohne zusätzliche Visualisierung der Armbänder die Beurteilungsdauer gegenüber den übrigen Versuchsbedingungen signifikant zunahm ($\eta^2 = .154$). Hypothesenkonträr wurden keine Effekte des prototypischen vibrotaktilen Feedbacks auf die empfundene Realitätsnähe (H2) oder Eignung für haptische Bewertung (H3) festgestellt.

Abkürzungsverzeichnis

AABB	Axis-Aligned-Bounding-Box
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AV	Abhängige Variable
CAVE	Cave-Automatic-Virtual-Environment
DEMO	Demonstration
DMU	Digitaler Mock-Up
DV	Dependent Variable
FOR	Field-of-Regard
FOV	Field-of-View
FPS	Frames-per-Second
Fx	Forschungsfrage x
HDMI	High-Definition-Multimedia-Interface
HMD	Head-Mounted-Display
Hx	Hypothese x
IPD	Interpupillardistanz
IV	Independent Variable
IVU	Immersive virtuelle Umgebung
LCD	Liquid-Crystal-Display
OBB	Oriented-Bounding-Box
PEP	Produktentstehungsprozess
PMU	Physischer Mock-Up
SDK	Software-Development-Kit
KOMBI	Versuchsgruppe mit kombiniertem Kollisionsfeedback
SSQ	Simulator-Sickness-Questionnaire
SUS	Slater-Usoh-Steed-Questionnaire
UV	Unabhängige Variable
VE	Virtual Environment
VIBRO	Versuchsgruppe mit vibrotakilem Kollisionsfeedback
VISU	Versuchsgruppe mit visuellem Kollisionsfeedback
VR	Virtuelle Realität
VU	Virtuelle Umgebung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispieldarstellung eines virtuellen Fahrzeuginnenraums.	2
Abbildung 2: Gegenüberstellung der Symptomprofile von Cybersickness und von Simulator-Sickness (modifiziert nach Stanney et al., 1997, S. 1139).....	8
Abbildung 3: Von Stanney et al. (1997) vorgeschlagene Kategorisierung von Symptomen basierend auf Maßen der zentralen Tendenz (Mittelwert oder Median) (modifiziert nach Stanney et al., 1997, S. 1139).....	9
Abbildung 4: Frühe Prinzipdarstellung eines HMD-basierten Systems.....	11
Abbildung 5: Immersives projektionsbasiertes VR-System.....	14
Abbildung 6: Schematische Darstellung des menschlichen Wahrnehmungsprozesses.....	16
Abbildung 7: Klassifikation der Hinweisreize des Tiefensehens nach Goldstein (2010, S. 230 ff.).....	17
Abbildung 8: Effektive Reichweite verschiedener Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung Cutting & Vishton (1995, modifiziert nach Goldstein, 2010, S. 235).....	18
Abbildung 9: Vergenz-Akkomodations-Konflikt bei 3D-Displays.	21
Abbildung 10: Prototyp eines HMDs mit mehreren Akkommodationsebenen. ...	21
Abbildung 11: Fokusproblem bei 3D-Darstellung in Systemen ohne Eye- Tracking.....	23
Abbildung 12: Screenshot einer Internetbildersuche nach dem Stichwort „seating buck“ zur Illustration unterschiedlicher Ausprägungen einer „Sitzkiste“.....	25
Abbildung 13: Beispieldarstellung einer Head-Mounted-Display-basierten Sitzkiste.	26
Abbildung 14: Beispieldarstellung einer projektionsbasierten Sitzkiste in einer CAVE.....	26
Abbildung 15: Schematische Darstellung der virtuellen Sitzkiste.....	27
Abbildung 16: In der virtuellen Sitzkiste verwendetes HMD – NVIS nVisor ST50.	28
Abbildung 17: Gegenüberstellung (a) des realen „Pointers“ und (b) der Visualisierung in VR.....	29
Abbildung 18: In der Hand gehaltener Pointer.	29
Abbildung 19: Beispiel für die Durchführung einer Erreichbarkeitsbeurteilung in der virtuellen Sitzkiste.....	30
Abbildung 20: Akteure und deren Aufgaben bei einer immersiven Innenraumabsicherung.	36
Abbildung 21: Kabelführung des in der Untersuchung verwendeten NVIS nVisor ST50 Head-Mounted-Displays.....	49

Abbildung 22: Prinzipdarstellung der Visualisierung simulierter Luftströme in der immersiven virtuellen Umgebung.....	58
Abbildung 23: Beispiel für unterschiedliche Reichweiten einer sitzenden Person nach Art des Griffs und der daraus resultierenden Greifräume im Fahrzeugcockpit.....	61
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Sichtverdeckung aus der Fahrerposition.....	63
Abbildung 25: Versuchsplan der quasi-experimentellen Laboruntersuchung zum Einfluss der Display Fidelity auf die Beurteilung eines Fahrzeuginnenraums.....	69
Abbildung 26: Stimulusmaterial: Darstellung des gleichen Fahrzeuginnenraums mithilfe eines Konzeptfahrzeugs (a), eines Hardware-Mock-Ups (b) und in der virtuellen Sitzkiste (c).....	70
Abbildung 27: Schematischer Ablauf der Versuchsdurchführung für die Gruppen mit simulierter Innenraumabsicherung im Konzeptfahrzeug (grün), Hardware-Mock-Up (blau) und virtueller Sitzkiste (orange).....	81
Abbildung 28: Funktionsweise des haptischen Renderings nach Salisbury (2004).	101
Abbildung 29: Beispieldarstellung einer Sitzkiste mit Force-Feedback-Aufbau.....	108
Abbildung 30: Verschiedene Formen von Hüllkörpern (blau) in Abhängigkeit zur Präzision des Einschlusses eines Objekts sowie der Dauer der Kollisionsprüfung.....	110
Abbildung 31: Beispieldarstellung der Veränderung einer variablen Axis-Aligned-Bounding-Box bei Objektrotation.....	111
Abbildung 32: Beispieldarstellung einer verfrühten Kollisionserkennung durch Überschneidung der Bounding-Boxen mit AABB-Algorithmus...	112
Abbildung 33: Versuchsplan der Quasi-Experimentellen Laboruntersuchung zur Steigerung der Display Fidelity von virtuellen Prototypen durch vibrotaktilen Feedback.....	115
Abbildung 34: Vibrotaktiler Armband "VibroTac" am Handgelenk eines Nutzers.....	117
Abbildung 35: Darstellung des Aufbaus und der Komponenten eines VibroTac-Armbandes.....	117
Abbildung 36: VibroTac-Armband mit einem am Deckel befestigten ARTTRACK3-Tracking-Target.....	118
Abbildung 37: Screenshot der programmierten Ansteuerungslogik im Flow-Graph-Systems "Logic-Network-Editor" der VR-Software RTT DeltaGen 12.....	120
Abbildung 38: Anordnung der VibroTac-Vibrationselemente und Zusammenfassung zu logischen Elementgruppen.....	121
Abbildung 39: Screenshot: Netz zur Ansteuerung der ersten drei physischen Aktoren sowie der logischen Zwischenelemente eines VibroTac im Flow-Graph-System der VR-Software RTT DeltaGen 12.....	122

Abbildung 40: Darstellung des verwendeten virtuellen Fahrzeuginnenraums in einer Straßenumgebung.....	123
Abbildung 41: Darstellung des (a) virtuellen Fahrzeuginnenraum aus Nutzersicht, (b) der hinzugefügten Hilfsobjekte und der (c) entstehenden Approximation der Innenraumoberflächen im Versuch.....	123
Abbildung 42: Schematische Darstellung einer Oberfläche (blau) durch die native AABB (a) und durch kombinierte AABB mehrerer Hilfsobjekte (b).....	124
Abbildung 43: Darstellung der virtuellen Manschetten als Repräsentation der VibroTac Armbänder und des Pointers. Die Abbildung zeigt eine Versuchsperson mit den Händen am Lenkrad.	125
Abbildung 44: Eintauchen des Interaktions-Devices „Pointer“ in die Sonnenblende bei der Erreichbarkeitsprüfung der Eingriffsmulde der Sonnenblende.....	126
Abbildung 45: Schematischer Ablauf der Versuchsdurchführung für die Gruppen mit vibrotaktilem (grün), visueller (blau) und kombinierter (orange) Kollisionsrückmeldung.....	134
Abbildung 46: Visuelle Kollisionsrückmeldung beim Eintauchen der virtuellen Manschetten in die Armauflage.	140
Abbildung 47: Gegenüberstellung der Erreichbarkeitsbewertung von Medienanschlüssen ohne (a) und mit Visualisierung (b) der vibrotaktilem Armbänder.....	140
Abbildung 48: Zusammensetzung der durchschnittlichen Gesamtdauer der Innenraumbeurteilung pro Versuchsgruppe (in Minuten), nach Anteilen mit (blau) und ohne (grün) Innenraumkontakt.	145
Abbildung 49: Gegenüberstellung der Visualisierung in den Gruppen „vibrotaktilem“ (a, linkes Bilderpaar) ohne Visualisierung der Armbänder und „kombiniert“ (b, rechtes Bilderpaar) mit transparenten Manschetten bei der Beurteilung der Erreichbarkeit des Handschuhfachgriffs (oberes Bilderpaar) und der Medienanschlüsse (unteres Bilderpaar).....	152
Abbildung 50: Vor- und Nachteile der visuellen Nachkontrolle bei der Beurteilung der Armauflage ohne eine Visualisierung der vibrotaktilem Armbänder (a), mit einer abstrakten Visualisierung (b) und mit einem menschenähnlichen Avatar (c).	153
Abbildung 51: Position des im Versuch am Handgelenk getragenen VibroTac (orange) und für die Bewertung der Armauflagen besser geeignete Position am Unterarm (blau).....	155
Abbildung 52: Gegenüberstellung der Erreichbarkeitsbewertung von Medienanschlüssen (a) ohne Avatar-Visualisierung und (b) mit Visualisierung der vibrotaktilem Armbänder.	157
Abbildung 53: Apple AirPods als Beispiel für die Miniaturisierung von tragbaren, kabellosen Ausgabegeräten.	161

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Merkmalshäufigkeiten innerhalb der Stichprobe (N = 12)	43
Tabelle 2: Von den Befragten während oder nach der virtuellen Beurteilung empfundene Nebenwirkungen (N = 12)	47
Tabelle 3: Übersicht der Merkmalshäufigkeiten innerhalb der Stichprobe (N = 96)	79
Tabelle 4: Dauer der Innenraumbeurteilung sowie der Untersuchungsdurchführung pro Versuchsgruppe (N = 95)	81
Tabelle 5: Beurteilung der Erreichbarkeit von Bedienelementen nach Display Fidelity der Innenraumdarstellung (N = 95)	87
Tabelle 6: Beurteilung der Sicht nach außen nach Display Fidelity der Innenraumdarstellung (N = 95)	87
Tabelle 7: Beurteilung des Raumgefühls nach Display Fidelity der Innenraumdarstellung (N = 96)	88
Tabelle 8: Im Versuch aufgetretene Cybersickness-Symptome (N = 32)	89
Tabelle 9: Übersicht der durchgeführten Hypothesentests	95
Tabelle 10: Übersicht der Merkmalshäufigkeiten innerhalb der Stichprobe (N = 87)	133
Tabelle 11: Dauer der Innenraumbeurteilung sowie der Untersuchungsdurchführung pro Versuchsgruppe (N = 87)	135
Tabelle 12: Effizienz der Aufgabenerfüllung nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 86)	144
Tabelle 13: Empfundene Realitätsnähe nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 87)	146
Tabelle 14: Eignung für haptische Bewertung nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 87)	147
Tabelle 15: Im Versuch aufgetretene Cybersickness-Symptome (N = 87)	148
Tabelle 16: Empfundene Presence nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 87)..	149
Tabelle 17: Übersicht der durchgeführten Hypothesentests	160

1 Einleitung

Im globalen Wettkampf um die Technologieführerschaft und Marktanteile von elektrischen und autonomen Fahrzeugen sind Automobilkonzerne stärker denn je gefordert, innovative neue Produkte zu entwickeln und gleichzeitig die Entwicklungszeiten erheblich zu verkürzen. Ein großes Potential hierfür bietet die *virtuelle Absicherung* von Produkteigenschaften.

Klassischerweise werden nach wie vor viele Fahrzeugeigenschaften während der Entwicklung an physischen Prototypen beurteilt. Diese Vorgehensweise wird als *Absicherung* (Abschnitt 3.1.3) bezeichnet und hat ihren Ursprung in der Zeit vor der digitalen Konstruktion. Sie bringt drei immanente Nachteile für die moderne Fahrzeugentwicklung mit sich. Erstens erzeugt der Aufbau physischer Prototypen finanziellen Aufwand, der den Gewinn eines Unternehmens reduziert bzw. den Preis des Produkts für den Kunden erhöht. Zweitens dauert der Aufbau eines physischen Prototyps je nach Komplexität mehrere Wochen oder sogar einige Monate, wodurch auch die Absicherung erst nach diesem Zeitraum stattfinden kann. Drittens schreitet parallel zum Aufbau des Prototyps die technische Entwicklung voran, somit stellt der aufgebaute physische Prototyp bereits bei seiner Fertigstellung einen (um die Aufbautdauer) veralteten Entwicklungsstand dar. Die Ausprägung dieser Nachteile verstärkt sich mit wachsender Komplexität bzw. Detaillierung des physischen Prototyps. Darüber hinaus muss jeder physische Aufbau nachträglich demonstriert und fachgerecht recycelt bzw. entsorgt werden.

Eine vielversprechende Alternative, die es erlaubt, Fahrzeuge zu entwickeln, ohne Millionen für physische Prototypen auszugeben, ist die *virtuelle Absicherung* (Abschnitt 3.1.3). Hierbei werden digitale Konstruktionsdaten zu dreidimensionalen Modellen aufbereitet, sodass die Eigenschaften des sich im Entwicklungsprozess befindlichen Fahrzeugs in virtueller Realität (VR) dargestellt und überprüft werden können (Abbildung 1). Das übergeordnete Ziel der *virtuellen Absicherung* ist es, anhand von Daten Entscheidungen darüber zu treffen, ob die zu Projektbeginn festgelegten Eigenschaften des Fahrzeugs nach wie vor den Markt- und Projektanforderungen entsprechen oder ob Anpassungen erforderlich sind. Durch die *virtuelle Absicherung* können die Kosten und Herstellungszeit für physische Prototypen vermieden und die Aktualität der zur Absicherung dargestellten Daten verbessert werden.

Die Beurteilung in *immersiven* virtuellen Umgebungen ist als eine Form von virtueller Absicherung besonders interessant, da die Benutzer dabei in eine virtuelle Welt „eintauchen“ und dort ein Gefühl des Vor-Ort-seins verspüren. Durch den im Vergleich zu einem physischen Prototyp minimalen und wiederverwendbaren Aufbau einer *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4), die physisch einen rudimentären Fahrerplatz abbildet, kann die beurteilende Person mittels eines Head-Mounted-Displays von der Versuchsumgebung abgeschirmt werden (Abschnitt 2.2.1). Hierdurch stellt sich schnell das Gefühl ein, tatsächlich im virtuellen Fahrzeug zu sitzen (Abschnitt 2.1.2).



Abbildung 1: Beispieldarstellung eines virtuellen Fahrzeuginnenraums.

Quelle: Eigene Darstellung.

Nach einigen Minuten hat sich eine Person in einem immersiven virtuellen Fahrzeugprototyp ein Urteil über ein Fahrzeug gebildet, in dem sie sich strenggenommen physisch nie befand. Während sie im physischen Prototypen einen wochenlangen Datenstand beurteilt hätte, sind die virtuellen Daten tagesaktuell aufbereitet. Diese Art der Prototypdarstellung hilft bereits in einer frühen Entwicklungsphase, ein Gefühl für das Produkt (bspw. zu verschiedenen Varianten) zu bekommen.

Gleichzeitig ist die Zuverlässigkeit der Beurteilungsergebnisse nicht ausreichend erforscht, die anhand von immersiven virtuellen Prototypen gewonnen werden.

Zum einen liegen nur wenige Studienergebnisse vor, die unter praxisnahen Bedingungen entstanden sind, und zum anderen sind diese Ergebnisse aufgrund der Individualität von VR-Systemen zum Teil schwer auf andere Systeme übertragbar.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Absicherung von Produkteigenschaften in Fahrzeuginnenräumen anhand immersiver virtueller Prototypen. Dabei spielt die objektive Abbildungstreue, die sog. *Display Fidelity*, eine zentrale Rolle (Bowman & McMahan, 2007). Es handelt sich um die Exaktheit, mit der ein System Sinnesreize reproduzieren kann (Gerathewohl, 1969). Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der *Display Fidelity* auf die Beurteilung von immersiven virtuellen Prototypen erforscht. Hierzu wurde nach einem Vorstudienmodell im Mixed-Methods-Design eine qualitative Vorstudie (Kapitel 3) mit zwölf Sachverständigen verschiedener Fachgebiete (Technische Entwicklung, Marketing, Kundenzufriedenheit etc.) zur Generierung von Forschungshypothesen durchgeführt, die anschließend in zwei quantitativen Folgestudien (Kapitel 4 und 5) empirisch anhand von größeren Stichproben überprüft wurden. Die zentralen Fragestellungen der Arbeit lauten:

1. Welche Aspekte der *Display Fidelity* sind aus der Sicht der Nutzenden besonders wichtig für die Erfüllung der Absicherungsaufgabe? Welche Faktoren verhindern den Ersatz von physischen Fahrzeugprototypen durch virtuelle?
2. Wie zuverlässig und exakt sind die anhand der immersiven Prototypendarstellung erhobenen Ergebnisse im Vergleich zu klassischen physischen Prototypen?
3. Lassen sich die Erlebbarkeit und der mögliche Absicherungsumfang von virtuellen Prototypen durch vibrotaktilen Kollisionsfeedback steigern?

Das Ziel der Arbeit ist es, durch unter praxisnahen Bedingungen gewonnene Ergebnisse zum Erkenntnisgewinn über die Zuverlässigkeit immersiver virtueller Absicherung unter verschiedenen Ausprägungen der *Display Fidelity* beizutragen.

Die Untersuchungen der Forschungsfragen und Überprüfung der Hypothesen wurden an einem bestehenden immersiven VR-System in der Technischen Entwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg durchgeführt.

2 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten zentralen Begriffe zu immersiven virtuellen Umgebungen (2.1) sowie zu entsprechenden Darstellungssystemen (2.2) definiert und erläutert.

Das erste Unterkapitel (2.1) geht zunächst auf *immersive virtuelle Umgebungen* (IVU) ein und beschreibt nachfolgend die zentralen Konzepte *Display Fidelity* als die objektiven Eigenschaften einer IVU (2.1.1) und *Presence* als die subjektive Reaktion auf eine IVU (2.1.2). Es folgt ein Überblick über die Zusammenhänge bei der Erledigung von Aufgaben in einer IVU, der sog. *Task Performance* (2.1.3), sowie infolge der Nutzung von IVU unter Umständen auftretenden *Cybersickness* (2.1.4).

Im zweiten Unterkapitel (2.2) werden zunächst grundlegende Arten von Systemen zur Darstellung von IVU vorgestellt. Hierzu zählen Head-Mounted-Display-basierte (2.2.1) und projektionsbasierte Darstellungssysteme (2.2.2). Es folgt eine Darlegung des durch die Displaytechnik entstehenden Einflusses auf die menschliche Raumwahrnehmung (2.2.3). Darauf aufbauend schließt das zweite Unterkapitel mit der Beschreibung des für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendeten VR-Systems *virtuelle Sitzkiste* (2.2.4).

2.1 Immersive virtuelle Umgebungen

Immersive virtuelle Umgebungen (IVU) sind simulierte Umgebungen, die in einem gewissen Maße so aussehen und wirken wie die Realität. Eine Person empfindet in solchen künstlichen Umgebungen ein Gefühl des Vor-Ort-Seins, kann sich darin durch Kopf- oder Augenbewegungen orientieren, hat ein Gefühl für den sie umgebenden Raum und die Möglichkeit, mit darin existierenden Objekten zu interagieren (Psootka, 1995, S. 406 f.).

Eine Abgrenzung von immersiven zu nicht-immersiven virtuellen Darstellungen erfolgt im Rahmen der Beschreibung von immersiven Darstellungssystemen in Abschnitt 2.2.

2.1.1 Display Fidelity – Die objektive Abbildungstreue des VR-Systems

Display Fidelity ist die *objektive* Abbildungstreue eines Darstellungssystems und beschreibt die Exaktheit, mit der ein System Sinnesreize reproduzieren kann (Gerathwohl, 1969, S. 1). Es handelt sich dabei um objektive quantifizierbare Systemeigenschaften (Slater & Wilbur, 1997, S. 3).

Die von Slater & Wilbur (1997) vorgeschlagene Trennung von objektiven (*Immersion*) und subjektiven (*Presence*) Bestandteilen einer IVU führte aufgrund der Begriffswahl oft zu Missverständnissen innerhalb des Forschungsfeldes (Slater, 2003). Diese Arbeit folgt dem Vorschlag von Bowman et al. (2012, S. 3) und verwendet *Display Fidelity* als Synonym für Slater & Wilburs Immersionsbegriff zur Beschreibung quantifizierbarer Systemeigenschaften.

Ein Beispiel für *Display Fidelity* ist die Pixelauflösung und -dichte eines Displays. Je mehr Pixel ein Display insgesamt darstellen kann, desto präziser ist die Abbildung. Je höher die Pixeldichte eines Displays ist, desto weniger kann das menschliche Auge die einzelnen Pixel auseinanderhalten. Der Betrachter nimmt ein hochauflöstes Display weniger als „Projektionsfläche“ wahr, wodurch das Dargestellte stärker in den Vordergrund rückt. Demnach hat jedes Darstellungssystem eine *Display Fidelity*, die höher oder niedriger sein kann, aber immer vorhanden ist (Bowman et al., 2012).

Sofern die Darstellung des virtuellen Prototyps in der Lage ist, Produkteigenschaften ausreichend realitätsgetreu abzubilden, lassen sich daran Optimierungen des Produkts erarbeiten. Gleichzeitig sind virtuelle Prototypen im Vergleich zu physischen jedoch anfällig für Fehler durch Berechnungsverzögerung, Zeitverzögerung beim Bildaufbau oder dem Unbehagen der Benutzenden in der VR-Umgebung (Wang, 2002).

Bowman & McMahan (2007) hielten fest, dass es wichtig ist, einzelne Einflussfaktoren der *Display Fidelity* zu erforschen, um bspw. Aussagen dazu zu treffen, ob eine immersive Art der Darstellung für eine bestimmte Aufgabe besser oder schlechter geeignet ist als eine nicht immersive. Gleichzeitig sei es problematisch einzelne Faktoren zu untersuchen, während alle anderen kontrolliert werden. Die so gewonnenen Ergebnisse über den untersuchten Faktor seien zwar generalisierbar, jedoch könne auch der Zustand der kontrollierten Faktoren einen signifikanten

Einfluss auf das Ergebnis haben. Weiterhin bliebe bspw. unklar, bei welchen Aufgaben die Nutzerinnen und Nutzer von welchen Faktoren und welcher Abbildungstreue profitierte. (2007, S. 40 ff.).

2.1.2 Presence – Der subjektive Eindruck in einer immersiven virtuellen Umgebung

Gegenüber der *Display Fidelity* ist *Presence* der subjektive Eindruck des Vor-Ort-Seins (engl. *sense of being there*), den die Benutzenden in einer IVU empfinden (Slater, 2003).

Der Begriff *Presence*, der sich in Fachpublikationen durchgesetzt hat (siehe ISPR, 2000), wird Steuer (1992, S. 75 f.) zugeschrieben und ist die Kurzform von *Telepresence*. Der subjektive Eindruck entsteht durch die sensorische Wahrnehmung (Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995, S. 475) und hängt von der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen *Display Fidelity* des Systems ab.

Das Gefühl von *Presence* ist intra- und interindividuell. Sowohl unterschiedliche Nutzer desselben VR-Systems als auch ein und derselbe Nutzer zu verschiedenen Zeitpunkten können unterschiedliche Ausprägungen von *Presence* empfinden (Bowman & McMahan, 2007, S. 38).

Steuers Konzept wurde von anderen Forschern aufgegriffen und weiterverfolgt (Nash, Edwards, Thompson & Barfield, 2000). Slater und Kollegen argumentierten, dass die Erhöhung der *Presence* die Chancen steigere, dass die Nutzenden sich in der IVU gleichermaßen verhalten würden wie in einer äquivalenten realen Situation.

Wird die sich in der IVU befindende Person von der Versuchsumgebung bspw. durch ein Head-Mounted-Display abgeschirmt (sog. *Inclusiveness*), begünstigt dies ein höheres *Presence*-Empfinden (Slater & Wilbur, 1997, S. 5–6).

2.1.3 Task Performance

Die *Absicherung* von Eigenschaften anhand von virtuellen Prototypen ist eine Aufgabe, die von Benutzenden in einer IVU bearbeitet wird. Es handelt sich genaugenommen um eine Methode, die an eine äquivalente aus der Realität angelehnt wurde. Um zu überprüfen, ob das neue Medium die Bearbeitung der übertragenen

Aufgabe gleichermaßen ermöglicht wie die Realität, ist es notwendig zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Absicherung valide sind und wie sich die Leistung der Benutzenden bei der Bearbeitung der Aufgabe vergleichsweise zur gleichen Tätigkeit in der Realität verhält.

Generell erlauben Leistungsmessungen einerseits aus der Realität in die virtuelle Realität übertragene Verfahren hinsichtlich deren Anwendbarkeit in der vermittelnden Umgebung zu überprüfen, andererseits lassen sich damit mehrere Verfahren innerhalb der gleichen virtuellen Umgebung miteinander vergleichen. Obgleich eine Aufgabe im eigentlichen Wortsinn weder eine Leistung erbringen oder leistungsfähig sein kann, soll der in dieser Arbeit verwendete Begriff *Task-Performance* deutlich machen, dass es bei der Leistungsbewertung nicht etwa um die Leistung der einzelnen Nutzer an sich geht, sondern um die Bewertung eines Verfahrens in einem medienvermittelnden System.

Für die Bewertung der *Task-Performance* kommen sowohl objektive Größen wie Dauer der Aufgabenbearbeitung, Geschwindigkeit oder Präzision in Frage als auch subjektive Aspekte wie bspw. die empfundene Benutzerfreundlichkeit (engl. *perceived ease of use*) und empfundene Nützlichkeit (engl. *perceived usefulness*) der verwendeten Technologie (Bowman & Hodges, 1999, S. 42; Davis, 1986).

2.1.4 Cybersickness

Cybersickness bezeichnet eine Reihe von körperlichen Symptomen, die als Begleiterscheinung während oder nach der Nutzung einer IVU auftreten können (Joseph J. LaViola, 2000; Schuemie, van der Straaten, Krijn & van der Mast, 2001, S. 188). Das Auftreten solcher Symptome kann sowohl Nutzende in ihrer *Task-Performance* einschränken als auch dazu führen, dass sie die Nutzung des Systems meiden.

Der Begriff *Cybersickness* geht auf Stanney, Kennedy & Drexler (1997) zurück, die in ihrer Arbeit aufzeigten, dass die von VR-Systemen verursachten Symptome sich von denen zur damaligen Zeit herkömmlichen nicht VR-basierten Flugsimulatoren unterschieden (Abbildung 2). Sie griffen damit die Arbeit von Kennedy, Lane, Berbaum & Lilienthal (1993) zur *Simulator-Sickness* auf und verwendeten den von den Autoren entwickelten *Simulator-Sickness-Questionnaire* (SSQ). Stanney et al. (1997) zeigten auf, dass sich *Cybersickness* sowohl im Symptomprofil (bezogen

auf die Subskalen des SSQ) als auch in der Symptomschwere von *Simulator-Sickness* unterscheidet (Abbildung 2).

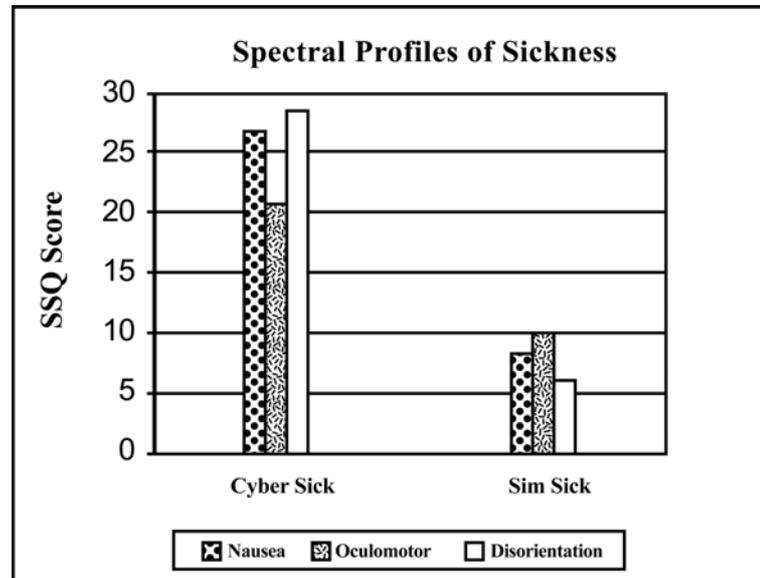


Abbildung 2: Gegenüberstellung der Symptomprofile von Cybersickness und von Simulator-Sickness (modifiziert nach Stanney et al., 1997, S. 1139).

Über die Jahre entwickelte sich der SSQ zu einem etablierten Instrument bei der Erhebung und Auswertung von *Cybersickness*. Das ursprüngliche Ziel bei der Entwicklung des SSQ bestand darin, ein Instrument zu entwickeln, das speziell auf die nach dem Simulatoreinsatz (bspw. Pilotentraining im Flugsimulator) entstehenden Symptome (sog. *Simulator-Sickness*) abgestimmt war (Kennedy et al., 1993). Aufgrund der Ähnlichkeit zu der bei der Reisekrankheit auftretenden Symptome diente der von Kellogg, Kennedy und Graybiel (1965) entwickelte Motion-Sickness-Questionnaire als Vorlage. Kennedy et al. (1993) reduzierten hierzu mithilfe der Faktoranalyse (anhand von 1.119 Datenpaaren; pre-/post-exposure) die ursprünglichen 28 Symptome des MSQ auf 16 für die Simulator-Sickness relevanten. Hierbei erarbeiteten sie eine dreifaktorielle Lösung für folgende Symptomcluster (Kennedy et al., 1993, S. 205 ff.):

1. *Oculomotor*: Symptome in Verbindung mit dem Augenbewegungsnerve (Überanstrengung der Augen, Probleme bei der Fokussierung, verschwommene Sicht, Kopfschmerzen).
2. *Disorientation*: Symptome der Desorientierung (Schwindel, Gleichgewichtsstörungen).

3. *Nausea*: Symptome der Übelkeit

(Magenbeschwerden, erhöhte Speichelbildung, Aufstoßen).

Die gewichteten Subskalen erlauben eine differenzierte Betrachtung der Symptome, während der Gesamt-Score dabei hilft, die Simulationsumgebung im Ganzen einzuordnen (Abbildung 3).

SSQ SCORE	CATEGORIZATION
0	No symptoms
<5	Negligible symptoms
5-10	Minimal symptoms
10-15	Significant symptoms
15-20	Symptoms are a concern
>20	A bad simulator

Abbildung 3: Von Stanney et al. (1997) vorgeschlagene Kategorisierung von Symptomen basierend auf Maßen der zentralen Tendenz (Mittelwert oder Median) (modifiziert nach Stanney et al., 1997, S. 1139).

2.2 Darstellungssysteme für immersive virtuelle Umgebungen

Bei Systemen zur Darstellung von virtuellen Umgebungen wird in der Literatur gelegentlich zwischen immersiven und nicht-immersiven Systemen unterschieden. Psozka (1995) schlug vor, VR-Systeme als Kombination aus der eingesetzten Technik und deren Effekte auf den Menschen zu verstehen. Er unterteilte VR-Systeme in *immersive* und *nicht-immersive* Systeme und beschrieb den primären Effekt eines immersiven Systems als das Versetzen einer Person in eine simulierte Umgebung, die in einem gewissen Maße so aussieht und wirkt wie die Realität.

Diese Arbeit folgt dem Vorschlag von Slater & Wilbur (1997, S. 3), nach dem Immersion als eine Ansammlung von objektiven Systemeigenschaften zu verstehen ist. Die Immersionseigenschaften eines Systems sind ein Kontinuum, in dem ein System mehr oder weniger immersiv sein kann (Bowman & McMahan, 2007, S. 39). Der Übergang von immersiven zu nicht-immersiven Systemen lässt sich nach Slater (2009) wie folgt definieren:

There is a fundamental difference between an immersive and non-immersive system: in an ideal immersive system it is possible in principle to fully simulate what it is like to go into a non-immersive system (. . .) However, this property of immersive systems is not symmetric — it is not possible inside a non-immersive display to simulate all of the actions of what it is like to go into an immersive system (Slater, 2009, S. 3550).

Funktional betrachtet existieren VR-Systeme, die primär darauf ausgelegt werden, ein Gefühl von Presence zu erzeugen (Bystrom, Barfield & Hendrix, 1999, S. 241). Die Nutzerinnen und Nutzer solcher Systeme sollen das Gefühl empfinden, in die virtuelle Umgebung „einzutauchen“. Ein solches System diene zur Durchführung der empirischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit und wird in Abschnitt 2.2.4 detailliert dargestellt. Andere VR-Systeme dienen bspw. dazu, komplexe Sachverhalte darzustellen, bei denen die Aufgabenerledigung nicht vordergründig vom Presence-Empfinden abhängig ist (Bowman & McMahan, 2007, S. 39 f.).

Unterschiedliche VR-Systeme sind aufgrund der verwendeten Komponenten häufig individuell und nur schwer miteinander vergleichbar. Dennoch lassen sich grundlegende Funktionen beschreiben, die typischerweise von einem VR-System übernommen werden. Nach Sanchez-Vives & Slater (2005, S. 333) liefert ein immersives VR-System eine stereoskopische Darstellung mit kanalgetrennten Bildern für das linke und das rechte Auge, die auf einem Computer berechnet und in Echtzeit aktualisiert wird. Als Grundlage für die Darstellung dient eine Szene, die in einer Datenbank oder als Ansammlung von Dateien gespeichert wird. Die Szene beinhaltet sowohl geometrische Objekte als auch deren Eigenschaften. Eine Rendering-Pipeline berechnet perspektivische Projektionen der dreidimensionalen Geometrien für die Darstellung auf zweidimensionalen Projektionsflächen oder Displays in Abhängigkeit der Kopf und/oder Augenposition der benutzenden Person. Hierzu erfasst ein sog. Tracking-System die Position und Ausrichtung des Kopfes und/oder der Augen und sendet diese Informationen als Datenstrom an das System. Die den Objekten zugeordneten Eigenschaften sind bspw. Farben, Texturen etc., aber auch komplexe Bewegungsanimationen oder physikalische Attribute (Gewicht, Härte etc.). Manche der Szenenobjekte sind passiv, mit anderen können die Nutzenden interagieren. Hierzu wird häufig zumindest eine Hand des Nutzers oder ein geführtes Interaktions-Device vom Tracking-System erfasst.

Die Erfassung der Kopfbewegung des Nutzers zur Steuerung der Bilderzeugung ist sowohl wichtig, um Perspektive und Bewegungsparallaxe zu berechnen, als auch um die räumliche Abbildungstreue (engl. spatial fidelity) zu erhöhen (Bystrom et al., 1999, S. 242). Darüber hinaus empfinden die Nutzenden durch die Szenensteuerung mittels ihrer Köpfe vestibuläre Reize, welche die Interaktion als natürlicher erscheinen lassen (Sanchez-Vives & Slater, 2005, S. 332).

Zwei generelle Arten von Systemen für die Darstellung von IVU haben sich bis heute durchgesetzt (Bubb, Bengler, Grünen & Vollrath, 2015, S. 592 ff.). Es handelt sich um *immersive projektionsbasierte Systeme* (Abschnitt 2.2.2), die mit großen Projektionsflächen arbeiten und häufig als betretbarer Raum aufgebaut sind, sowie um Systeme, bei denen die immersive Darstellung über ein *Head-Mounted-Display* (HMD) erfolgt (Abschnitt 2.2.1). Beide Systemtopologien werden in den folgenden Abschnitten skizziert und deren für diese Arbeit relevanten Eigenheiten beschrieben.

2.2.1 Head-Mounted-Display-basierte Systeme

Bei der ersten Art von VR-Systemen erfolgt die immersive Darstellung durch ein Head-Mounted-Display. HMDs sind Ausgabegeräte, die von Benutzerinnen und Benutzern am Kopf getragen werden (Abbildung 4). Im Unterschied zu Polarisations- oder Shutterbrillen, die bei projektionsbasierten Systemen (Abschnitt 2.2.2) zum Einsatz kommen, erfolgt die Bilderzeugung direkt im HMD. Für die stereoskopische Bilddarstellung wird jedem Auge ein individuelles, perspektivisch korrektes Bild zur Verfügung gestellt. Hierzu muss der tatsächliche Augenabstand der nutzenden Person oder ein Näherungswert im System hinterlegt werden.

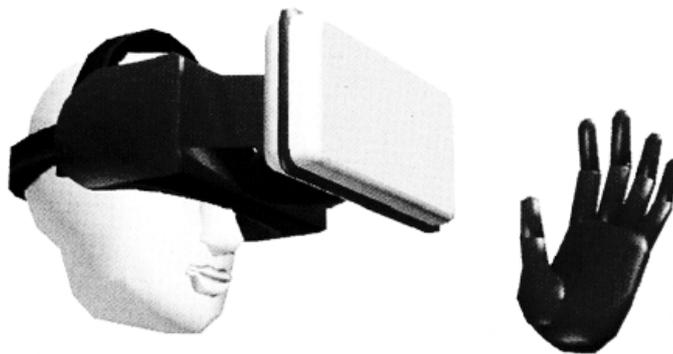


Abbildung 4: Frühe Prinzipdarstellung eines HMD-basierten Systems. Quelle: Cruz-Neira, Sandin, DeFanti, Kenyon & Hart (1992).

Das für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit verwendete VR-System ist HMD-basiert, daher werden die technologischen Merkmale im Folgenden näher erläutert.

Konventionelle HMD-Modelle enthalten zwei Displaymodule (Wann, Rushton & Mon-Williams, 1995, S. 2731). Durch die Verwendung von zwei Modulen ist es möglich, jedem der beiden Augen die maximale Auflösung zur Verfügung zu stellen. In frühen Modellen mit Kathodenstrahlröhren wurden die Röhren seitlich vom Kopf angebracht und das Bild nach vorne zum Auge geleitet, was sich positiv auf die Gewichtsverteilung und negativ auf die Baugröße auswirkte. In späteren Modellen mit Liquid-Crystal-Displays (LCD) wurden beide Displaymodule an der Stirnseite des Displays angebracht, wodurch sich das Gewicht des HMDs stark nach vorne verlagert. Durch eine rückwärtige Kabelführung wird versucht, einen Gewichtsausgleich und angenehmeren Tragekomfort zu erreichen. Die Displaymodule oder Umlenkspiegel sind häufig verstellbar konstruiert, um sie an individuelle Gesichtsproportionen anpassen zu können. Viele HMDs haben integrierte, manche zusätzlich verstellbare Stereo-Kopfhörer.

Der Einsatz von HMDs zur Darstellung von IVU beinhaltet gegenüber projektionsbasierten Systemen einige Vor-, aber auch einige Nachteile. Unabhängig von der eigentlichen Darstellungsqualität stellt das HMD bspw. eine zusätzliche Masse (von bis zu mehreren Kilogramm) am Kopf von Nutzenden dar, das bei Kopfbewegungen durch Muskelarbeit stabilisiert werden muss (Knight & Baber, 2007; Wille, 2016; Wille, Grauel & Adolph, 2013). Bei untrainierten Menschen kann diese Muskelbelastung Krämpfe oder andere Nebenwirkungen hervorrufen und verändert die normale Körperhaltung von Nutzenden (Knight & Baber, 2007, S. 804). Bei einem HMD-Gewicht von über einem Kilogramm können plötzliche Bewegungen zu einer Verletzung der Nackenwirbel führen (Wilson, 2007, S. 117 ff.). Weiterhin kann sowohl eine starre Kabellage die natürliche Bewegungsfreiheit einschränken als auch ein geringes Field-of-View (FOV) zu unnatürlichen Kopfbewegungen zwingen (Arthur, 2000; Venturino & Wells, 1990). Field-of-View bezeichnet hier das Sichtfeld, welches ohne Kopfbewegungen wahrgenommen werden kann. Weiterhin führt ein eingeschränktes FOV zu einer falscher Raumwahrnehmung (Psołka, 1995, S. 407);

FOV, Darstellungsqualität und Gewicht von HMDs hängen derzeit noch stark zusammen (Arthur, 2000, S. 10). Für ein möglichst großes FOV wird das Bild im Rechner verzerrt („Kissenverzerrung“) und anschließend über Linsen optisch „aufgespreizt“. Stark vereinfacht verhält es sich damit wie folgt: Je hochwertiger die Darstellung und je größer das FOV werden sollen, desto größere, schwerere und hochwertigere Linsen müssen verwendet werden. Deshalb ist die Auswahl eines für die Anwendung geeigneten HMDs derzeit häufig ein Kompromiss zwischen hoher Auflösung und großem FOV (Lorenz, Kaiser, Assmann, Engstler & Zöllner, 2008, S. 7). Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist, dass die Bildveränderung der IVU überwiegend durch Kopffrotation realisiert wird und die Augenbewegung unberücksichtigt bleibt. Letzteres verhindert bspw. eine plausible Berechnung von Unschärfeverläufen (siehe Abschnitt 2.2.3.4).

Dennoch bieten HMDs den Vorteil, Benutzerinnen und Benutzer stärker von der realen Umgebung abzuschirmen als projektionsbasierte Systeme. Dies führt jedoch gleichzeitig dazu, dass Nutzende ihren eigenen Körper in der IVU nicht sehen können. Dieser sollte jedoch für ein stärkeres Presence-Empfinden visualisiert werden (Slater & Wilbur, 1997, S. 3). Forscher zeigten auf, dass der Mensch einen virtuellen Körper als eigenen annimmt, selbst wenn dieser eine andere Hautfarbe (Peck, Seinfeld, Aglioti & Slater, 2013) oder auch unmenschliche Gliedmaßen aufweist (Kilteni, Groten & Slater, 2012).

2.2.2 Immersive projektionsbasierte Systeme

Immersive projektionsbasierte Systeme bestehen aus mehreren großen Projektionsflächen, die so angeordnet sind, dass sie die nutzende Person teilweise oder auch vollständig umgeben (Abbildung 5). Das in der Literatur häufig genannte und namensstiftende Beispiel ist die Cave-Automatic-Virtual-Environment (CAVE) von Cruz-Neira, Sandin, DeFanti, Kenyon & Hart (1992). Ein umgebender Aufbau eines projektionsbasierten Systems ermöglicht ein größeres Field-of-Regard (FOR), also der sichtbare Bereich, der durch Kopfdrehung wahrgenommen werden kann (Bowman & McMahan, 2007, S. 38).

Bei diesen auch als Immersive-Projection-Technology bezeichneten Systemen kommen Polarisations- oder Shutterbrillen zur stereoskopischen Kanaltrennung zum Einsatz. Diese benötigen nur wenige bis gar keine elektronischen Komponenten oder Anschlusskabel und sind dadurch leicht und flexibel in der Nutzung. Die

Brille wird häufig durch ein optisches Trackingverfahren erfasst, sodass ebenfalls keine Zusatzelektronik oder Verkabelung an den Brillen notwendig ist. Durch das Anbringen mehrerer Lautsprecher kann ein solches System mit Raumklang auralisiert werden (Husung, Wall, Pöschl, Weber & Döring, 2013; Pöschl, Wall & Döring, 2013).

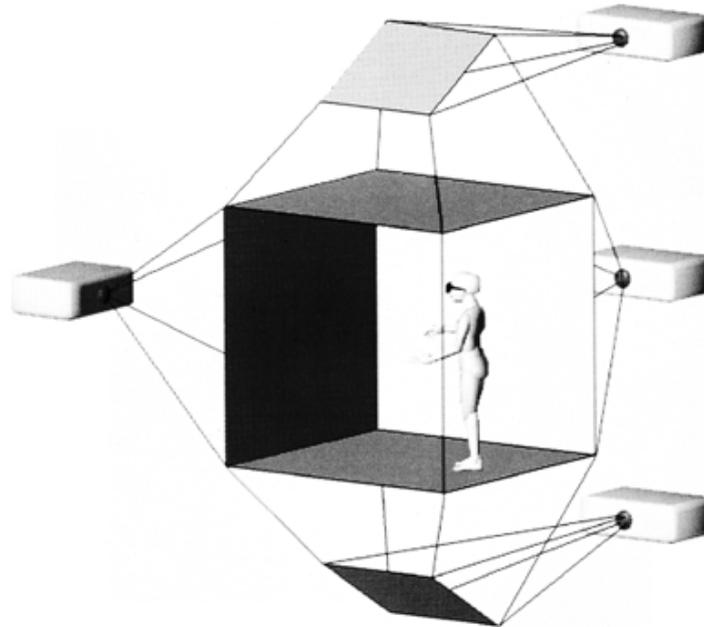


Abbildung 5: Immersives projektionsbasiertes VR-System. Quelle: Cruz-Neira, Sandin, DeFanti, Kenyon & Hart (1992).

Eine Eigenheit solcher Systeme ist die Sichtbarkeit des eigenen Körpers, aufgrund derer eine dedizierte Darstellung einer virtuellen Körperrepräsentation (engl. virtual embodiment) nicht notwendig ist. Da eine Verkörperung zur stärkeren Presence beiträgt (Slater & Wilbur, 1997, S. 3), ist dies zunächst ein Vorteil solcher Systeme. Jedoch gibt es gleichzeitig zwei potentielle Probleme. Zum einen können die eigenen Körperteile Bereiche verdecken, die eigentlich zwischen dem Körperteil und den Augen eines Nutzenden liegen, was den stereoskopischen Effekt zunichtemachen kann (Cruz-Neira, Sandin & DeFanti, 1993, S. 138). Diese Verdeckungen treten auch auf, sobald sich mehr als eine Person in der Projektionseinrichtung befindet. Zum anderen sehen Nutzende die am Körper getragenen Geräte (bspw. für haptisches Feedback), wodurch die Plausibilität der Darstellung sinken kann.

2.2.3 Einfluss der Displaytechnik auf die Raumwahrnehmung

Für eine realistische, dreidimensionale Wirkung der virtuellen Umgebung, aber auch zur besseren Navigation und zur höheren User-Performance bei Greif- und Manipulationsaufgaben, werden visuelle Hinweisreize simuliert (für einen Überblick siehe Nash et al., 2000), die den Nutzenden einen räumlichen Eindruck vermitteln. Hierzu erzeugen VR-Systeme perspektivische Projektionen von dreidimensionalen Objekten auf zweidimensionalen Displays (Hoffman, Girshick, Akeley & Banks, 2008, S. 2; Sanchez-Vives & Slater, 2005, S. 333). Die sensorische Verarbeitung der simulierten visuellen Reize erfolgt nach den gleichen Prinzipien wie in der Realität, deren äquivalente Stimulation hingegen birgt systemimmanente Probleme. So sind VR-Systeme bspw. nicht in der Lage, eine so hohe *Display Fidelity* von Reizen zu erzeugen, die Benutzerinnen und Benutzer aus der Realität gewohnt sind (Psotka, 1995). Des Weiteren lassen sich aufgrund prinzipieller Grenzen der Displaytechnologie nicht alle visuellen Hinweisreize auf die gleiche Art und Weise stimulieren wie in natürlicher Umwelt (Wann et al., 1995) und führen dadurch ggf. zu einer verzerrten Raum- und Tiefenwahrnehmung und darauffolgend zu verzerrten Bewertungen von virtuellen Prototypen.

Im Folgenden werden die Grundlagen der visuellen Raum- und Tiefenwahrnehmung des Menschen (2.2.3.1 bis 2.2.3.3) skizziert sowie die Unterschiede bei der Simulation von Hinweisreizen in HMD- (2.2.3.4) und projektionsbasierten Systemen (2.2.3.5) erläutert.

2.2.3.1 Visuelle Raum- und Tiefenwahrnehmung des Menschen

Der Mensch nimmt seine natürliche Umgebung dreidimensional wahr. Er interpretiert diesen Eindruck aus zweidimensionalen Abbildungen auf der Retina, die durch okulomotorische Informationen ergänzt werden (Goldstein, 2010, S. 230). Retinale Abbildungen entstehen, wenn Lichtstrahlen des sichtbaren, elektromagnetischen Spektrums, die von Objekten unserer Umgebung reflektiert oder emittiert wurden, auf die Netzhaut treffen (Goldstein, 2010, S. 44). Sinneszellen im Auginneren reagieren auf Reize einer bestimmten Wellenlänge und wandeln diese (Farb-)Informationen in elektrische Signale um. Aus der Menge und Position der gereizten Sinneszellen lassen sich Richtung und Intensität der einfallenden Lichtstrahlen bestimmen. Es entsteht ein Abbild auf der Retina. Gleichzeitig jedoch kann weder die

einzelne Sinneszelle noch der gesamte Verbund bestimmen, aus welcher Entfernung ein Lichtstrahl reflektiert oder emittiert wurde (Goldstein, 2010, S. 230). Daher interpretiert das menschliche Gehirn anhand der ihm angebotenen Hinweisreize und unter Zuhilfenahme von Vorwissen die retinale Abbildung hinsichtlich plausibler Tiefeninformationen und generiert daraus einen Raumeindruck.

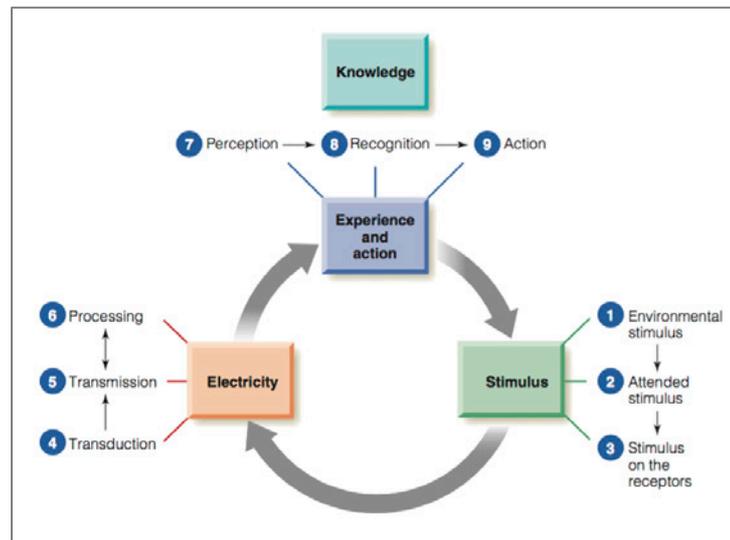


Abbildung 6: Schematische Darstellung des menschlichen Wahrnehmungsprozesses. Quelle: Goldstein (2010, S. 5).

Goldstein (2010, S. 5) beschrieb diesen visuellen Wahrnehmungsprozess als sich wiederholende Sequenz von Teilprozessen (Abbildung 6). Sobald ein visueller Stimulus in den (1) Wahrnehmungsbereich und anschließend in den (2) Aufmerksamkeitsbereich gelangt, trifft er auf die (3) Rezeptoren im Auge. In diesen findet eine (4) Transduktion statt, bei der die einfallenden Lichtwellen in elektrische Impulse umgesetzt und letztere an das Gehirn (5) transmittiert werden. Im Gehirn werden die Impulse (6) neuronal vorverarbeitet und das Gesehene wird (7) wahrgenommen. Das Gesehene kann dann (8) erkannt und interpretiert werden und das Gehirn daraufhin reizbezogen (9) handeln. Während der letzten drei Schritte wird die visuelle Wahrnehmung durch Wissen beeinflusst.

Goldstein (2010, S. 230 ff.) ordnete visuelle Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung (Abbildung 7) folgenden Gruppen zu:

1. *Okulomotorische Hinweisreize*, die der Mensch durch die Wahrnehmung der Augenstellung sowie anhand der Anspannung der Augenmuskulatur gewinnt.

2. *Monookulare Hinweisreize*, die mithilfe von einem Auge gewonnen werden können.
3. *Binokulare Hinweisreize* sind jene, für deren Wahrnehmung zwingend beide Augen benötigt werden.

Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung			
Okulomotorische	Monookulare		Binokulare
	Bildbezogene Reize	Bewegungsreize	
Konvergenz (Convergence)	Verdeckung (Occlusion)	Bewegungsparallaxe (Motion Parallax)	Binokulare Disparität (Binocular disparity)
Akkommodation (Accommodation)	Relative Größe (Relative Size)	Zu- und Aufdecken (Deletion and Accretion)	
	Lineare Perspektive (Perspective)		
	Vertraute Größe (Familiar Size)		
	Texturgradient (Texture Gradient)		
	Schatten (Shadows)		
	Relative Höhe (Relative Height)		
	Atmosphärische Perspektive (Atmospheric Perspective)		

Abbildung 7: Klassifikation der Hinweisreize des Tiefensehens nach Goldstein (2010, S. 230 ff.). Quelle: Eigene Darstellung.

Unter den allgemein anerkannten Hinweisreizen zur Tiefenwahrnehmung identifizierten Cutting & Vishton (1995) neun Arten als besonders effizient zur Gewinnung von Tiefeninformationen. Dazu merkten sie an, dass der Begriff Raumwahrnehmung eigentlich nicht zutrifft, da der Mensch im eigentlichen Sinne keinen Raum wahrnimmt, sondern Objekte und deren Anordnung darin. Sie definierten weiterhin drei Entfernungsintervalle (Personal Space: 0–2 m; Action Space: 2–20 m; Vista Space: ab 30 m), innerhalb derer die Stimuli mit wechselnder Priorität ausgewertet werden, da die Informationsgewinnung auf Basis der einzelnen Hinweisreize für bestimmte Entfernungen besonders effektiv ist (Abbildung 8).

Die Autoren argumentierten, dass bereits die vergleichsweise große Anzahl von redundanten Informationsquellen sowohl auf die Komplexität der Aufgabe als auch auf die Bedeutung der Raumwahrnehmung für den Menschen deuten (Cutting & Vishton, 1995, S. 97).

Effektive Reichweite verschiedener Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung			
Tiefeninformation	Personal Space 0-2m	Action Space 2-20m	Vista Space über 30m
Zu- und Aufdecken (Deletion and Accretion)	x	x	
Verdeckung (Occlusion)	x	x	x
Relative Größe (Relative Size)	x	x	x
Akkommodation und Konvergenz (Accommodation and convergence)	x		
Bewegungsparallaxe (Motion Parallax)	x	x	
Relative Höhe (Relative Height)		x	x
Atmosphärische Perspektive (Atmospheric Perspective)			x

Abbildung 8: Effektive Reichweite verschiedener Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung Cutting & Vishton (1995, modifiziert nach Goldstein, 2010, S. 235).

Für das innerhalb dieser Arbeit verwendete HMD-basierte System sind abweichende Reizmechanismen in Abschnitt 2.2.3.4 beschrieben. Für ein umfassendes Verständnis werden in Abschnitt 2.2.3.5 ebenfalls die Besonderheiten von projektionsbasierten Systemen erläutert.

2.2.3.2 Mono- und binokulare Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung

Bei monokularen und binokularen Reizen werden Tiefen- bzw. Rauminformationen aus der Netzhautabbildung abgeleitet (Goldstein, 2010, S. 231). Hierbei ist der Mensch bspw. in der Lage, anhand der monokularen Retinalabbildung zu interpretieren, dass ein Objekt weiter entfernt ist als ein anderes, wenn ersteres vom zweiten verdeckt wird, dessen relative Höhe im Blickfeld sich unter dem Horizont befindet und gleichzeitig höher ist, als die des anderen Objekts. Oder wenn sich ersteres relativ zum zweiten Objekt langsamer bewegt. Diese Art der Informationsgewinnung erlernen Menschen nach und nach im Kindesalter (Cutting & Vishton, 1995, S. 105–107; Goldstein, 2010, S. 386–387). Sind sie einmal erlernt, funktionieren sie auch z.B. beim Verlust eines Auges. Bei der binokularen Auswertung werden Tiefeninformationen aus den unterschiedlichen Positionen eines Objektes auf beiden Augenbildern gewonnen. Diese Fähigkeit geht verloren, wenn nur ein Auge zur Verfügung steht und wird dann durch andere Informationsquellen kompensiert.

2.2.3.3 Okulomotorische Reize zur Tiefenwahrnehmung

Okulomotorische Reize entstehen durch *Vergenz* und *Akkommodation* der Augen (Goldstein, 2010, S. 231). Es handelt sich im Wesentlichen um Informationen über den Anspannungszustand der Augenmuskulatur.

Durch *Vergenz*, also der gleichförmigen (konjugierten) oder gegenläufigen (konvergenten) Rotation beider Augen, können verschiedene Punkte fixiert werden. Dabei wird der Bereich um den Fixationspunkt auf den zentralen Netzhautbereich projiziert.

Die *Akkommodation* des Auges bezeichnet eine durch den Ziliarmuskel ausgeführte Veränderung der Linsenkrümmung des Auges zur Fokussierung von Objekten (Goldstein, 2010, S. 44). Das fokussierte Objekt befindet sich dabei in einem Bereich der *Abbildungstiefe* (engl. depth of focus), der einem Entfernungsbereich (von etwa $\pm 0,3$ Dioptrien) entspricht, der befriedigend scharf abgebildet wird (Hoffman et al., 2008, S. 2). Dieser Bereich vergrößert oder verkleinert sich durch die Verengung bzw. Erweiterung der Pupille. Die Fokussierung geschieht zu etwa 80 % durch die Hornhaut (lat. Cornea) und zu 20 % durch die Krümmung der Augenlinse (Goldstein, 2010, S. 44).

Die Stimulation okulomotorischer Reize mithilfe konventioneller 3D-Displays führt zu Vergenz-Akkommodations-Problemen (Hoffman et al., 2008, S. 1; Huang, Chen & Wetzstein, 2015, S. 1; Wann et al., 1995, S. 2731). Aus diesem Grund nehmen Nutzende eine IVU häufig subjektiv kleiner wahr, als sie wirklich ist (Thompson et al., 2004, S. 562) und unterschätzen bspw. die absoluten Entfernungen darin (Kuhl, Thompson & Creem-Regehr, 2009).

2.2.3.4 Okulomotorische Besonderheiten von HMD-basierten Systemen

Bei den zuvor beschriebenen Mechanismen der Akkommodation und Vergenz gewinnt der Mensch Tiefeninformationen aus dem durch Vergenz herbeigeführten Winkel der Augen zueinander sowie der durch Akkommodation veränderten Krümmung der Linse. Anders als in der Realität akkommodieren die Augen bei der Betrachtung eines virtuellen Objektes mithilfe eines HMDs auf die nahen Grafikdisplays (Abbildung 9, S. 21) statt auf das in einiger Entfernung dargestellte Objekt (Hoffman et al., 2008, S. 2; Wann et al., 1995, S. 2731). Die durch Akkommodation

bestimmte Objektentfernung liegt im Bereich weniger Zentimeter. Der durch Vergenz eingestellte Winkel der Augen deutet hierbei auf eine andere Entfernung des Objektes. In diesem Fall liefern die okulomotorischen Hinweisreize diskrepante Informationen über die Objektentfernung zurück. Es entsteht ein sog. Vergenz-Akkommodations-Konflikt (Hoffman et al., 2008).

Dieses konstruktionsbedingte Problem lässt sich beim konventionellen HMD-Aufbau nicht vermeiden. Das hat zur Folge, dass selbst neue auf den Markt gebrachte HMDs bezogen auf diesen Aspekt eine technologische Sackgasse darstellen. Es existieren Bestrebungen zur Konstruktion von mehrschichtigen HMDs, die durch mehrere Displayebenen in der Lage sein werden, dem Auge verschiedene Akkommodationsdistanzen zu bieten (Hoffman et al., 2008; Huang et al., 2015). Diese haben ihrerseits das Problem, dass sie in der aktuellen Entwicklungsstufe nicht am Kopf getragen werden können, da zur präzisen Bestimmung der Brennweite der Kopf starr fixiert werden muss (siehe Abbildung 10, S. 21).

Steht eine bestimmte Entfernungsebene bei der Betrachtung der virtuellen Umgebung im Vordergrund der Untersuchung, kann die Akkommodationsebene durch Justage des HMDs auf diese Entfernung eingestellt werden, um das Problem abzuschwächen. Bubb (2015, S. 595) schlägt vor, für Untersuchungen an virtuellen Fahrzeuginnenräumen die Okulare eines HMDs auf die mittlere Entfernung der Objekte im Fahrzeuginnenraum von 0,8 – 1,2 m zu justieren.

Eine weitere häufig nicht beachtete Besonderheit von HMD-Systemen ist die personenbezogene Justierung eines HMDs (Kuhl et al., 2009). Wird ein System durch viele aufeinanderfolgende Nutzende verwendet, ist es häufig nicht möglich, eine individuelle Kalibrierung für jeden Nutzenden durchzuführen. Aus diesem Grund wird beispielsweise häufig eine Interpupillardistanz im Bereich von ca. 62–65 mm voreingestellt.

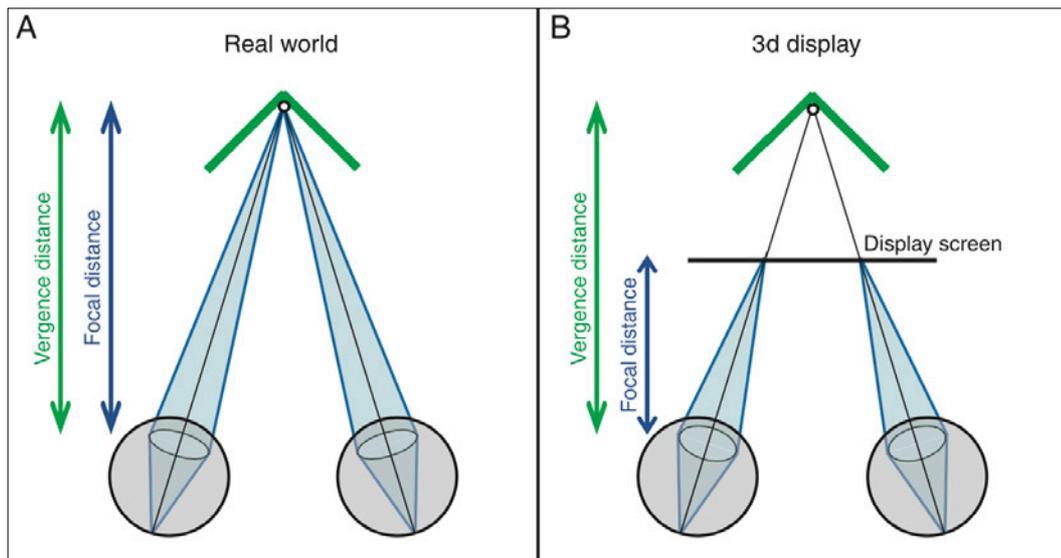


Abbildung 9: Vergenz-Akkommodations-Konflikt bei 3D-Displays. Quelle: Modifiziert nach Hoffman et al. (2008, S. 3).

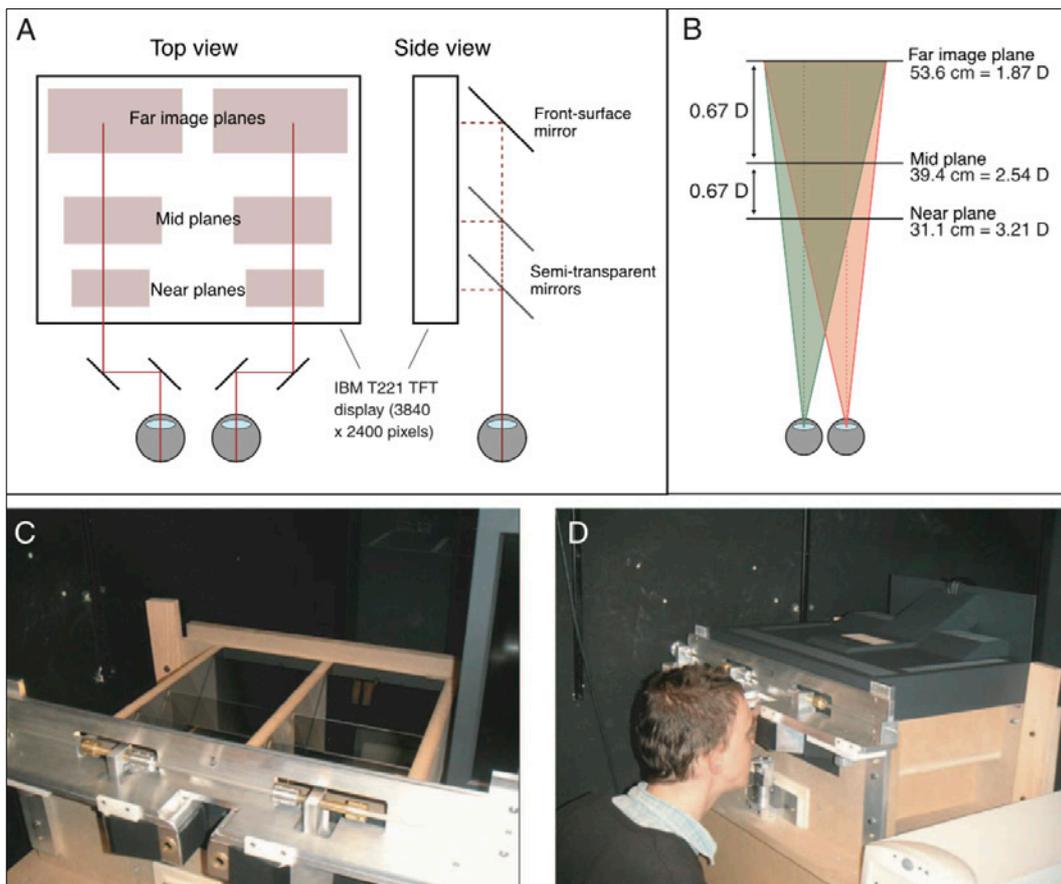


Abbildung 10: Prototyp eines HMDs mit mehreren Akkommodationsebenen. Quelle: Hoffman et al. (2008).

2.2.3.5 Okulomotorische Besonderheiten von projektionsbasierten Systemen

In projektionsbasierten Systemen entsteht ein Akkommodationskonflikt, sobald sich ein reales und virtuelles Objekt nebeneinander (auf einer Fokusebene) befinden. Das Auge ist hierbei nicht in der Lage, sowohl auf das physikalische Objekt als auch auf die weiter entfernte Projektionsfläche (virtuelles Objekt) zu fokussieren. Während beide Objekte in der Realität scharf abgebildet werden würden, erscheint ein Objekt unplausibel scharf, während das andere unscharf wahrgenommen wird (Lorenz et al., 2008, S. 6).

Bei der Absicherung von virtuellen Fahrzeugprototypen in projektionsbasierten Systemen (Abschnitt 2.2.2) kommen häufig Bestandteile eines Fahrzeugcockpits als Ergänzung der virtuellen Darstellung zum Einsatz. Hierbei tritt der beschriebene Effekt bspw. auf, wenn eine nutzende Person ein physisches Lenkrad vor sich hat, während die Instrumententafel virtuell dargestellt wird.

Weiterhin kommt es zum Verlust des dreidimensionalen Eindrucks, sobald der eigene Körper virtuelle Objekte verdeckt, die eigentlich ihrerseits den Körperteil verdecken würden. Wird bspw. ein Fahrzeuginnenraum ohne physische Komponenten gezeigt, kann das dazu führen, dass die Füße des Nutzers plötzlich das Lenkrad verdecken. Infolgedessen geht der räumliche Eindruck in der IVU verloren (siehe Abbildung 14, S. 26).

2.2.3.6 Systemübergreifende Hürden der visuellen Reizsimulation

Ein weiteres häufiges Problem in beiden Arten von Systemen ist der bei der Grafikerzeugung unberücksichtigte, in der Realität natürliche Unschärfeverlauf (engl. blur gradient). In der Realität ist das Bild auf der Netzhaut für die Entfernung am schärfsten, auf die das Auge fokussiert (siehe Abbildung 11). Objekte vor oder hinter der Abbildungstiefe des fokussierten Objekts erscheinen zunehmend verschwommener. Verschwommene Objekte sind demnach weiter weg oder näher gelegen als die fokussierte Stelle im Raum. Umgekehrt sind alle scharf abgebildeten Objekte etwa in der Entfernung, auf die fokussiert wird. Der Zusammenhang zwischen Verschwommenheit und Tiefe liefert zusätzliche Tiefeninformationen für die Raumwahrnehmung (Hoffman et al., 2008, S. 2).

Bei der Bildschirmdarstellung wird ein Bild häufig überall gleich scharf dargestellt. Isoliert betrachtet lassen sich aus dem fehlenden Unschärfeverlauf einer solchen Computerdarstellung keine plausiblen Informationen zur Lage der Objekte bestimmen. Die Augen melden gewissermaßen alle virtuellen Objekte in gleicher Entfernung zurück.

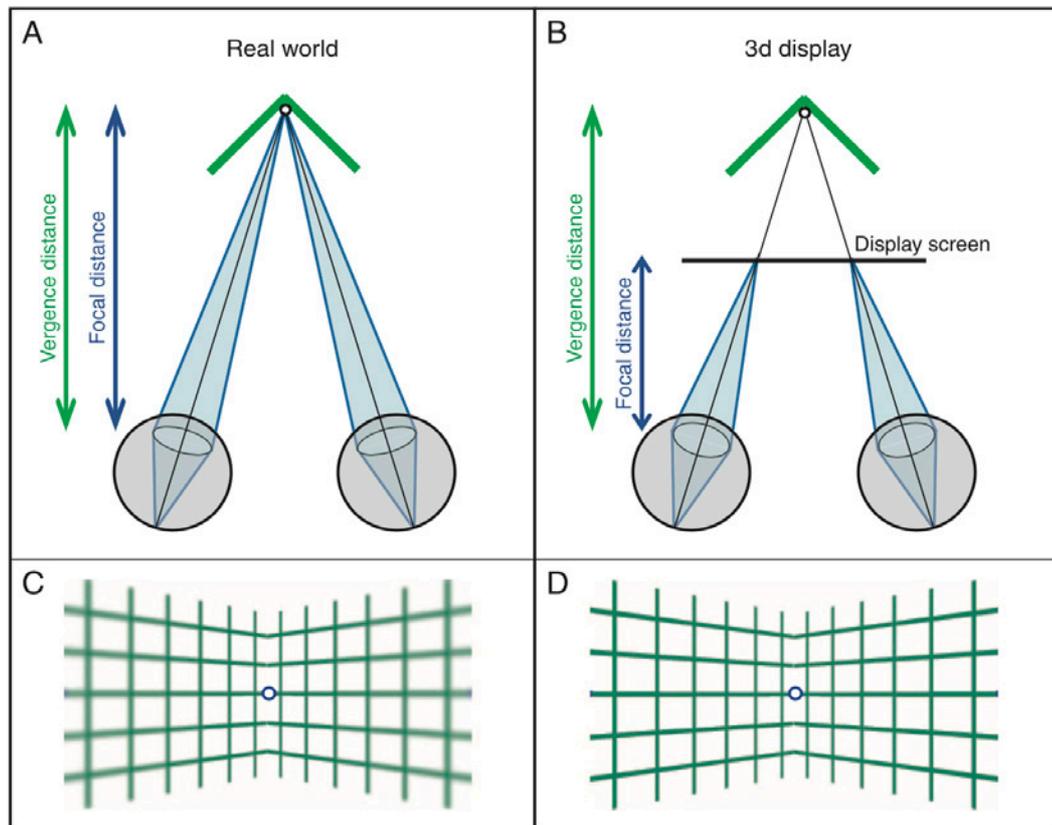


Abbildung 11: Fokusproblem bei 3D-Darstellung in Systemen ohne Eye-Tracking. Quelle: Modifiziert nach Hoffman et al. (2008).

Systembedingt ist die Berechnung eines Unschärfeverlaufs nur möglich, wenn die Blickrichtung des Benutzers durch ein Eye-Tracking-System erfasst wird. Für den praktischen Einsatz betrachtet würde dies einerseits den Anteil der (am Körper getragenen) Technik erhöhen und andererseits die Berechnung von Echtzeitgrafiken vor eine weitere Herausforderung stellen.

Ein weiterer Aspekt, der sich in einer IVU gegenüber der Realität unterscheidet, ist die Beleuchtung der dargestellten Umgebung. Aufgrund der komplexen Berechnung ist eine physikalisch korrekte Beleuchtung mit den für die immersive VR-Darstellung notwendigen Frameraten in den meisten heutigen Systemen nicht er-

reichbar (Ritschel, Dachsbacher, Grosch & Kautz, 2012). Deshalb wird die Lichtsetzung der virtuellen Szene häufig von Experten mithilfe von Erfahrungswerten am Computermonitor manuell so hergestellt, dass sie denen der Realität nahekommt. Zusätzlich zu dieser individuellen Komponente ist die Kalibrierung eines HMDs auf die gleichen optischen Darstellungseigenschaften aufgrund der dafür notwendigen Spezialausrüstung schwierig und wird daher häufig vernachlässigt. In projektionsbasierten Systemen, in denen zusätzlich physische Objekte verwendet werden, entspricht die passive Beleuchtung der physischen Objekte durch die Projektionsflächen ohne entsprechender Kalibrierung ebenso nicht den Lichtbedingungen in einer vergleichbaren realen Lichtsituation (Därr, 2010).

2.2.3.7 Diskussion

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass einige für die Raum- und Tiefenwahrnehmung zuständigen Mechanismen in VR-Systemen mit konventioneller Displaytechnologie nicht äquivalent zur Realität stimuliert werden können. Hervorzuheben ist dabei, dass sowohl HMD- als auch projektionsbasierte Systeme davon betroffen sind. Der Einsatz von HMDs führt zu einem Vergenz-Akkommodations-Konflikt, bei dem beide Mechanismen diskrepante Entfernungsinformationen liefern. Bei projektionsbasierten Systemen, in denen zusätzlich zu den virtuellen Objekten auch physische dargestellt sind (bspw. ein Lenkrad), entsteht ein Akkommodationskonflikt zwischen realen und virtuellen Objekten, die auf einer Tiefenebene liegen. Beides kann die Beurteilung bzw. Absicherung des Raumgefühls oder der Objektentfernungen beeinflussen. Obgleich beide Probleme Gegenstand von zahlreichen Forschungsarbeiten sind, existiert kein Konsens darüber, wie stark diese Phänomene tatsächlich die Raumwahrnehmung von Nutzenden beeinflussen. Die Arbeit von Cutting & Vishton (1995, S. 102) legt nahe, dass Akkommodation und Vergenz allenfalls eine mittlere Priorität haben, wenn es um die Bestimmung von Objektentfernungen (und somit um die Gewinnung eines Raumeindrucks) im Sichtradius 0–2 m geht. Dieser Entfernungsbereich spielt für die Beurteilung von Fahrzeuginnenräumen eine zentrale Rolle.

2.2.4 Darstellungssystem „Virtuelle Sitzkiste“

Sitzkisten (engl. seating buck) dienen der Fahrzeugindustrie als gängige Werkzeuge zur Beurteilung von unterschiedlichen Aspekten eines Fahrzeuginnenraumes in einer frühen Entwicklungsphase (Bubb et al., 2015, S. 590). Die Nutzenden einer *virtuellen Sitzkiste* tragen ein HMD, mithilfe dessen ein virtueller Fahrzeuginnenraum auf eine physikalische Sitzkiste projiziert wird (Bubb et al., 2015, S. 592; Salzmann & Froehlich, 2008, S. 75). Der Begriff Sitzkiste ist als loser Überbegriff zu verstehen, da er zur Beschreibung einer ausgeprägten Vielfalt von Konstruktionen verwendet wird (siehe Abbildung 12). Eine Sitzkiste bildet häufig einen Fahrerplatz und zuweilen einen Beifahrerplatz ab (Salzmann & Froehlich, 2008). Es existieren jedoch auch Aufbauten für zwei oder mehr Personen (Salzmann & Froehlich, 2008).

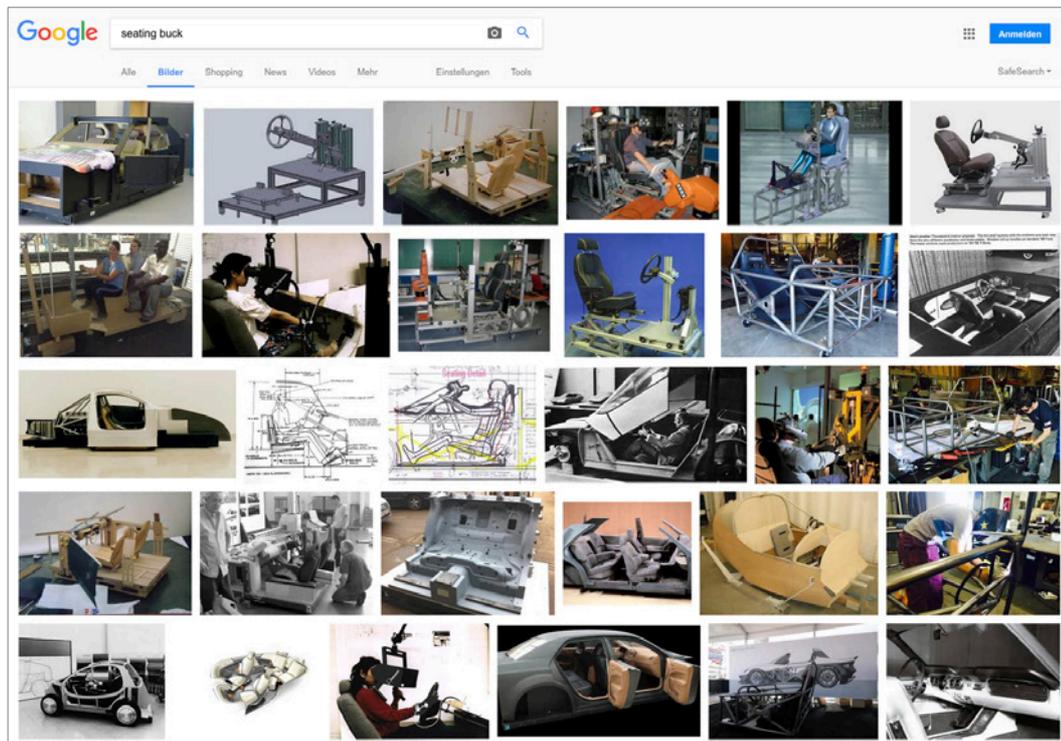


Abbildung 12: Screenshot einer Internetbildersuche nach dem Stichwort „seating buck“ zur Illustration unterschiedlicher Ausprägungen einer „Sitzkiste“.

Quelle: Eigene Darstellung.

Eine *virtuelle Sitzkiste* kann je nach Anwendungsfall sowohl HMD- (Abbildung 13) als auch projektionsbasiert (Abbildung 14) aufgebaut sein (Bubb et al., 2015, S. 592).



Abbildung 13: Beispieldarstellung einer Head-Mounted-Display-basierten Sitzkiste. Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 14: Beispieldarstellung einer projektionsbasierten Sitzkiste in einer CAVE. Quelle: Moehring (2013, S. 4).

Die für die Untersuchungen der Arbeit verwendete HMD-basierte Sitzkiste besteht im Wesentlichen aus einem Gestell, auf dem ein Fahrzeugsitz, ein Lenkrad und Pedalerie montiert sind (siehe Abbildung 15). Bei diesen Elementen handelt es sich um Bestandteile von Volkswagen Serienfahrzeugen. Die Befestigungspunkte dieser Elemente sind durch Elektroantriebe in mehreren Achsen einstellbar.



Abbildung 15: Schematische Darstellung der virtuellen Sitzkiste.

Quelle: Wall et al. (2014).

Die Konstruktion der Sitzkiste erlaubt somit eine variable und zugleich genaue computergestützte Verstellung dieser Komponenten anhand von Mess- oder Konstruktionsdaten und auch deren Anpassung an Innenraumproportionen verschiedener Fahrzeugprojekte. Sie bildet damit physisch einen minimalen Fahrerplatz ab, kann aber auch zur Bewertung aus der Perspektive eines Beifahrers genutzt werden. Physische und virtuelle Elemente befinden sich für Benutzerinnen und Benutzer an der gleichen Position im Raum, sodass bspw. beim Greifen des virtuellen Lenkrades in der IVU das physische Lenkrad haptisch wahrgenommen wird. Die Visualisierung erfolgt durch ein Head-Mounted-Display, dessen Position und Ausrichtung von einem optischen Trackingsystem erfasst wird. Ein Render-Cluster berechnet in Echtzeit aus den erfassten Daten in der Visualisierungssoftware RTT DeltaGen die daraus resultierende perspektivische stereoskopische Darstellung der IVU und des digitalen Fahrzeugmodells. Das virtuelle Fahrzeug befindet sich auf einer fotorealistischen Straßenkreuzung (Abbildung 1, S.2), um einen möglichst realitätsnahen Eindruck entstehen zu lassen.

Das eingesetzte HMD ist ein NVIS nVisor ST50 HMD mit einer Auflösung von 1280 x 1024 px pro Auge und einem gesamten horizontalem FOV von 40° und einem vertikalen FOV von 32°.



Abbildung 16: In der virtuellen Sitzkiste verwendetes HMD – NVIS nVisor ST50.
Quelle: EST Engineering Systems Technologies (2014).

Weiterhin können über das Trackingsystem auch verschiedene Interaktions-Devices in die Darstellung aufgenommen werden (Wall et al., 2014). Ein solches als „Pointer“ bezeichnetes Device kommt in der virtuellen Sitzkiste zum Einsatz. Es handelt sich dabei um einen aus Holz gefertigten, in der Hand geführten Grundkörper mit einem darauf montierten Tracking-Target (Abbildung 17, linke Darstellung). Die visuelle Darstellung des Pointers in der IVU dient als Referenz für den Zeigefinger der beurteilenden Person (Abbildung 17, rechte Darstellung). Hierzu legt die beurteilende Person ihren Zeigefinger auf die Spitze des Pointers (Abbildung 18), welche der virtuellen Pointerspitze entspricht (Abbildung 19).



(a) Pointer-Device



(b) Virtuelle Darstellung des Pointers

Abbildung 17: Gegenüberstellung (a) des realen „Pointers“ und (b) der Visualisierung in VR. Quelle: Eigene Darstellung.

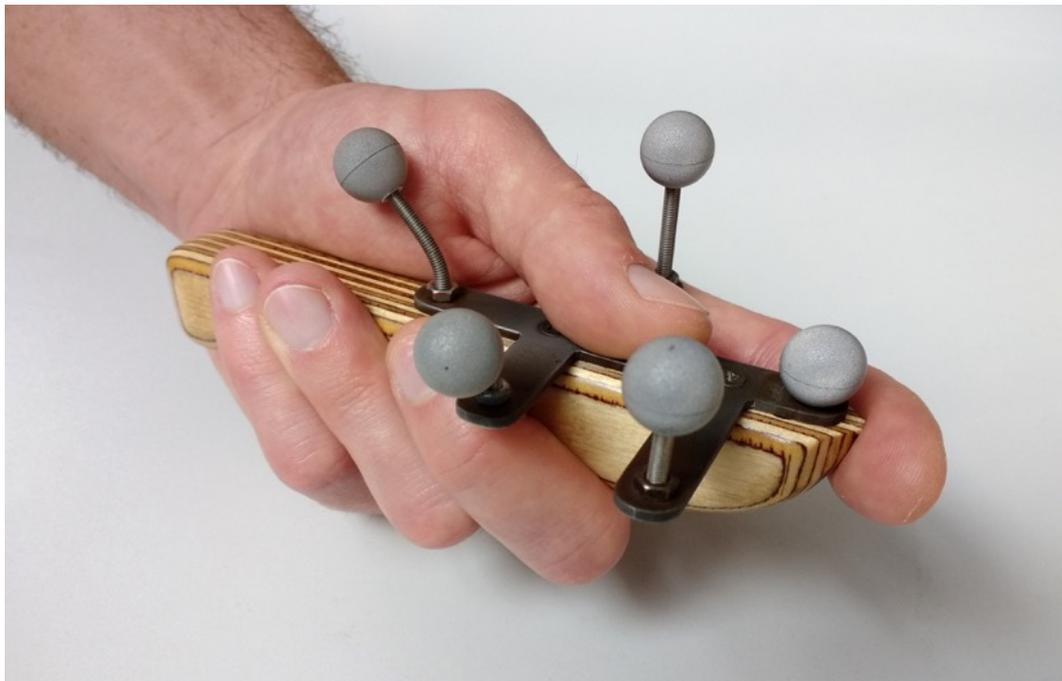


Abbildung 18: In der Hand gehaltener Pointer. Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 19: Beispiel für die Durchführung einer Erreichbarkeitsbeurteilung in der virtuellen Sitzkiste. Quelle: Eigene Darstellung.

Das für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendete System *virtuelle Sitzkiste* verfügt über keine virtuelle Darstellung des Körpers eines Benutzers oder einer Benutzerin (eines sog. Avatars). Weiterhin stand bei Beginn der Arbeit kein haptisches Feedback zur Verfügung. Ein solches wurde im Rahmen der Arbeit als prototypische Lösung implementiert und unter anderem im Hinblick auf Effizienzsteigerung untersucht (siehe Kapitel 5).

Während der Vorbereitung und Durchführung der empirischen Teilstudien dieser Arbeit wurde die für die Untersuchungen verwendete *virtuelle Sitzkiste* (Abbildung 15) fortwährend technisch weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung der elektromechanischen Komponenten blieb für die Studienteilnehmer unsichtbar und ist für die durchgeführten Untersuchungen nicht von Bedeutung. Das Gegenteil gilt für die soft- und hardwareseitige Aktualisierung des für die Erzeugung der IVU verwendeten Computersystems und des verwendeten Trackingsystems. Die geänderten Parameter haben einen direkten Einfluss auf die visuelle Qualität und Darstellungsleistung des Systems. Zur besseren Einordnung der Studienergebnisse wird daher die zum Zeitpunkt der Untersuchungsdurchführung verwendete Systemkonfiguration innerhalb der jeweiligen Teilstudie spezifiziert.

3 Vorstudie: Barrieren für den praktischen Einsatz von virtuellen immersiven Fahrzeugprototypen

Ogleich die Beurteilung virtueller Prototypen zum Beispiel im Zusammenhang mit der Automobilentwicklung seit mehreren Jahrzehnten als besonders vielversprechend beschrieben wird, argumentierten viele der Autoren gleichzeitig, dass die immersive virtuelle Darstellung noch weit davon entfernt ist, physische Prototypen im Ganzen zu ersetzen.

Zur Identifikation von relevanten Aspekten der *Display Fidelity* für die Beurteilungs- und Absicherungsaufgabe sowie zur Hypothesengenerierung für die nachfolgenden quantitativen Studien wurde nach dem Vorstudienmodell eine qualitative Vorstudie durchgeführt (Wall et al., 2014).

Das Ziel der Studie war es, an einem aktuellen VR-Darstellungssystem, welches ergänzend zu physischen Prototypen eingesetzt wird, zu untersuchen, welche Aspekte der *Display Fidelity* aus der Sicht der Nutzenden eine besondere Relevanz für die Beurteilungs- und Absicherungsaufgabe haben und welche Faktoren aus deren Sicht dem Ersatz von physischen Fahrzeugprototypen durch virtuelle im Wege stehen.

In den folgenden Abschnitten werden die der Studie zugrundeliegenden Begriffe definiert (3.1), die Forschungsfragen (3.2) formuliert, die Untersuchungsmethode (3.3) dargestellt sowie die Ergebnisse dargestellt und diskutiert (3.4).

3.1 Begriffsdefinitionen

Fahrzeugprototypen dienen der Darstellung von wichtigen Produkteigenschaften zur Untersuchung, Absicherung, Weiterentwicklung oder zur Demonstration des Produkts oder der Produktvarianten (Dai et al., 1996).

Neben den weitverbreiteten klassischen physischen Prototypen sog. *Physischen Mock-Ups* (PMU) arbeiten sowohl Industrie als auch Forschung an der Nutzung von digitalen Konstruktionsdaten zum Aufbau von virtuellen Prototypen, sog. *Digitalen Mock-Ups* (DMU). Der Aufbau und die Durchführung von Tests an diesen wird als *Virtual Prototyping* (Wang, 2002) bezeichnet.

Der Begriff *Virtual Prototyping* wird je nach Fachgebiet unterschiedlich verwendet. Aus der Sicht des Maschinenbaus wird damit die Ersetzung von physischen durch digitale Prototypen beschrieben, wobei deren Verwendung auch ohne menschliche Interaktion (etwa durch Simulation) stattfinden kann. Aus der Sicht der Computergrafik (als Teilbereich der Informatik) wird der Begriff mit dem Einsatz von Virtual Reality (VR) gleichgesetzt (Gomes de Sá & Zachmann, 1998). Die unterschiedliche Verwendung des Wortes *virtual* im Zusammenhang mit Prototypen bezeichnet nicht eindeutig immersive VR-Systeme oder immersive virtuelle Umgebungen (Wang, 2002, S. 7), wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden.

Im Folgenden werden die drei für die prototypische Produktdarstellung und -beurteilung verwendeten Begriffe *virtueller Prototyp* (3.1.1), *physischer Prototyp* (3.1.2) und *Absicherung von Produkteigenschaften* (3.1.3) für die Verwendung innerhalb dieser Arbeit erläutert und definiert.

3.1.1 Virtuelle Prototypen

Dai & Reindl (1996) definierten *virtuelle Prototypen* oder DMU als realistische Computersimulationen eines Produkts mit jeweils allen erforderlichen Funktionalitäten für Design und Entwicklung, Produktion, Produktservice bis hin zu Wartung und Produktrecycling.

3.1.2 Physische Prototypen

Die in dieser Arbeit betrachteten *physischen Prototypen* oder PMU sind Abbildungen des Fahrzeuginnenraums aus dunklem Kunststoff im Maßstab 1:1. Innenraumflächen und -konturen entsprechen dem zum Aufbauzeitpunkt vorhandenen Entwicklungsstand eines Fahrzeugprojekts. Die Kunststoffteile werden durch CNC-Fräsen hergestellt. Auf der Außenseite werden nach Bedarf Teile des Exterieurs aus einem hellgraugefärbten Kunststoff angebracht. Der Fokus dieser Darstellung liegt jedoch auf dem Fahrzeuginnenraum. Anstelle der späteren Verglasung werden Acrylglascheiben installiert.

3.1.3 Absicherung von Produkteigenschaften

Eigenschaften, wie „großzügiges Raumangebot“, über die ein marktreifes Fahrzeug verfügt, ergeben sich aus einem komplexen Zusammenspiel technischer Einzellösungen. Die in dieser Arbeit betrachteten Prototypen von Fahrzeuginnenräumen dienen dazu, solche Eigenschaften in einer frühen Entwicklungsphase darzustellen und zu bewerten, um infolgedessen die Entwicklung der technischen Lösungen zu steuern. Dieser Vorgang wird als *Absicherung* bezeichnet, da hierbei sichergestellt werden soll, dass die im Vorfeld festgelegten Produkteigenschaften als technische Lösungen umsetzbar sind und die Anforderungen erfüllen.

Die *virtuelle Absicherung* stellt solche Eigenschaften in Form der zuvor beschriebenen *virtuellen Prototypen* (Abschnitt 3.1.1) dar. Bei der *immersiven* virtuellen Absicherung werden virtuelle Prototypen in *immersiven virtuellen Umgebungen* (Abschnitt 2.1) dargestellt, die bei den Nutzenden ein Gefühl des Vor-Ort-Seins, der sog. *Presence* (2.1.2), erzeugen. Hierzu kommen spezielle VR-Darstellungssysteme (Abschnitt 2.2) zum Einsatz.

Schreiber & Zimmermann definierten diesen Vorgang wie folgt:

Als funktionale Absicherung bezeichnet man die rein virtuelle Abbildung eines Produktes, dessen Funktionalität in einer für den Benutzer als natürlich empfundenen Form zur Verfügung steht mit dem Ziel, Entscheidungen anhand dieser Darstellung zu treffen. Der Benutzer steht dabei im Mittelpunkt und soll möglichst keinen Unterschied zwischen einem realen und einem virtuellen Modell wahrnehmen (Schreiber & Zimmermann, 2011, S. 156).

Für die Durchführung einer Absicherung werden im Vorfeld alle notwendigen Daten für die virtuelle Darstellung aufbereitet, ggf. physische Mock-Ups als Ergänzung bereitgestellt und projektbeteiligte Fahrzeugexperten eingeladen. Letztere überprüfen die dargestellten Eigenschaften im Zusammenhang mit den markt- und kundenspezifischen Anforderungen. Solche Eigenschaften sind bspw. Aspekte der Funktionalität (Erreichbarkeit, Zugänglichkeit, Bedienungsfreundlichkeit von Bedienelementen), Sichtbarkeitsaspekte (z. B. gute Sicht auf die Umgebung durch Fenster und in den Spiegeln, geringe Sichtverdeckungen, keine störenden Spiegelungen in Fensterscheiben), aber auch ästhetische Aspekte (Linienführung, Proportionen, Anmutung der Materialien und Farben).

Als Ergebnis einer Absicherung entstehen Entscheidungen und Handlungsempfehlungen in Form von Protokollen zur weiteren Projektsteuerung.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden innerhalb dieser Arbeit anstelle der ausführlichen Formulierung „Absicherung von Produkteigenschaften“ die Begriffe „Beurteilung“ oder „Bewertung“ synonym verwendet.

3.1.4 Akteure und deren Rollen

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 dargelegt, findet die Beurteilung eines virtuellen Prototyps mittels eines VR-Systems zur immersiven virtuellen Darstellung statt. Teile eines *immersiven* virtuellen Darstellungssystem dienen definitionsgemäß der Interaktionsmöglichkeit von Benutzenden und der virtuellen Umgebung. Trotz des technischen Fortschritts stellt eine natürliche Interaktion in einer IVU eine große Herausforderung dar (Burdea & Coiffet, 2003, S. 16). Anhand des Beispiels eines virtuellen Fahrzeugprototyps betrachtet, gilt es die für die Beurteilungsaufgabe notwendigen Interaktionsmöglichkeiten abzubilden. Neben den in einem physischen Prototyp vorhandenen Interaktionen, wie dem Öffnen und Schließen einer Fahrzeugtür, kommen weitere in der Realität nicht vorhandene Interaktionen, wie bspw. das Ineinanderblenden/Überblenden unterschiedlicher Datensätze zu Vergleichszwecken hinzu. Die Vielfalt denkbarer Interaktionen ist eine Herausforderung an das Design von Interaktions-Devices und Bedienmetaphern sowie an die hierfür notwendige Berechnung (ein detaillierter Überblick kann Abschnitt 5.1.1 entnommen werden). Um einer das System nutzenden Person dennoch einen Zugang zu Interaktionen zu ermöglichen, die sie selbst aufgrund der Komplexität der Bedienung nicht ansteuern kann, kommen in der Praxis häufig Systemoperatoren und Moderatoren zum Einsatz. Diese Personen bilden eine Schnittstelle zum VR-System und übersetzen die bspw. über natürliche Sprache geäußerten Interaktionswünsche der benutzenden Person in komplexe Eingaben oder unterstützen diese durch mündliche Anleitung bei der Erfüllung einer Aufgabe. Den Rollen des Operators und Moderators kommt eine hohe Bedeutung zu, da sie als zusätzliche Schnittstelle zwischen den Benutzenden und dem virtuellen Prototyp stehen und somit bewusst oder unbewusst einen Einfluss auf die Ergebnisse der Prototypbeurteilung haben können.

Das in dieser Arbeit untersuchte VR-System *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) und die *Absicherung* von Eigenschaften in Fahrzeuginnenräumen (Abschnitt 3.1.3)

erfordert drei unterschiedliche Rollen, deren Funktion und Aufgaben in Abbildung 20 schematisch dargestellt und zum besseren Verständnis der vorliegenden Arbeit nachfolgend beschrieben werden.

Der *technische Operator* übernimmt die Inbetriebnahme und Bedienung des Systems. Zu den Aufgaben des Operators gehört es, die erforderlichen Datensätze für die Beurteilungsaufgabe in das VR-System zu laden sowie die Interaktionen mit der virtuellen Umgebung der sog. Szenensteuerung durchzuführen, die eine nutzende Person aufgrund der Systemkomplexität nicht eigenständig durchführen kann. Hierzu reagiert der Operator bspw. auf Sprachanfragen wie: „Können Sie bitte Variante A laden?“ Weiterhin bedürfen einzelne VR-Subsysteme in der Regel einer Kalibrierung, die ebenfalls von technischen Operatoren ausgeführt wird. Darüber hinaus beinhaltet die Rolle eines technischen Operators die Unterstützung der Benutzenden bei der Einrüstung mit der VR-Technik (bspw. Aufsetzen und Befestigen eines HMDs, Einsetzen in die Versuchsanlage etc.), mit der sie in der Regel nicht vertraut sind. Die nichtkorrekte Verwendung der Versuchsanlage führt sowohl zu verfälschten Ergebnissen als auch zu unerwünschten Nebenwirkungen (bspw. durch schief getragenes HMD).

Die das VR-System *benutzende, sachverständige Person* gehört im Fall dieser Arbeit zu einer Gruppe von Fachkräften, die gemeinsam für die Entwicklung eines Fahrzeugs zuständig oder verantwortlich sind. Sie nutzen das VR-System, um daran Entwicklungsschritte des virtuellen Prototyps zu verfolgen und zu beurteilen. Die Expertise dieser Personen beschränkt sich im Allgemeinen auf die Fahrzeugentwicklung, weshalb sie für die Nutzung des VR-Systems auf die technische Unterstützung eines Operators angewiesen sind.

Der *Moderator* ist im vorliegenden Fall das Bindeglied zwischen den Benutzerinnen und Benutzern und dem virtuellen Prototyp. Während der Operator bei der Bedienung der VR-Technik unterstützt, ist der Moderator für die inhaltliche Unterstützung zuständig. Ist der Nutzer durch ein HMD von der Versuchsumgebung abgeschirmt, übernimmt der Moderator bspw. das Vorlesen von Beurteilungskriterien des Fragebogens und notiert die mündlich mitgeteilten Bewertungsergebnisse des Benutzers. Dabei steht ein Moderator auch für inhaltliche Rückfragen zum virtuellen Fahrzeugprototyp zur Verfügung. Hat der Moderator zum Beispiel eine koordinative oder projektverantwortliche Aufgabe bei der Entwicklung des Fahrzeugs,

kann er domainübergreifende Anforderungen mit der beurteilenden Person diskutieren. Aufgrund des reaktiven Charakters dieser Datenerhebungsmethode ergeben sich unter Umständen die aus der wissenschaftlichen Befragungsmethodik bekannten Nachteile wie bspw. „verstärkte Antwortverfälschungen im Sinne sozial erwünschten Antwortens“ (Döring & Bortz, 2016, S. 357). Die Rolle eines Moderators bringt somit einerseits eine hohe Verantwortung gegenüber der Objektivität der Ergebnisse mit sich, kann andererseits ähnlich wie bei der teilstrukturierten Befragung die Beurteilung auf die für die Untersuchung des Prototyps besonders relevante Aspekte lenken.

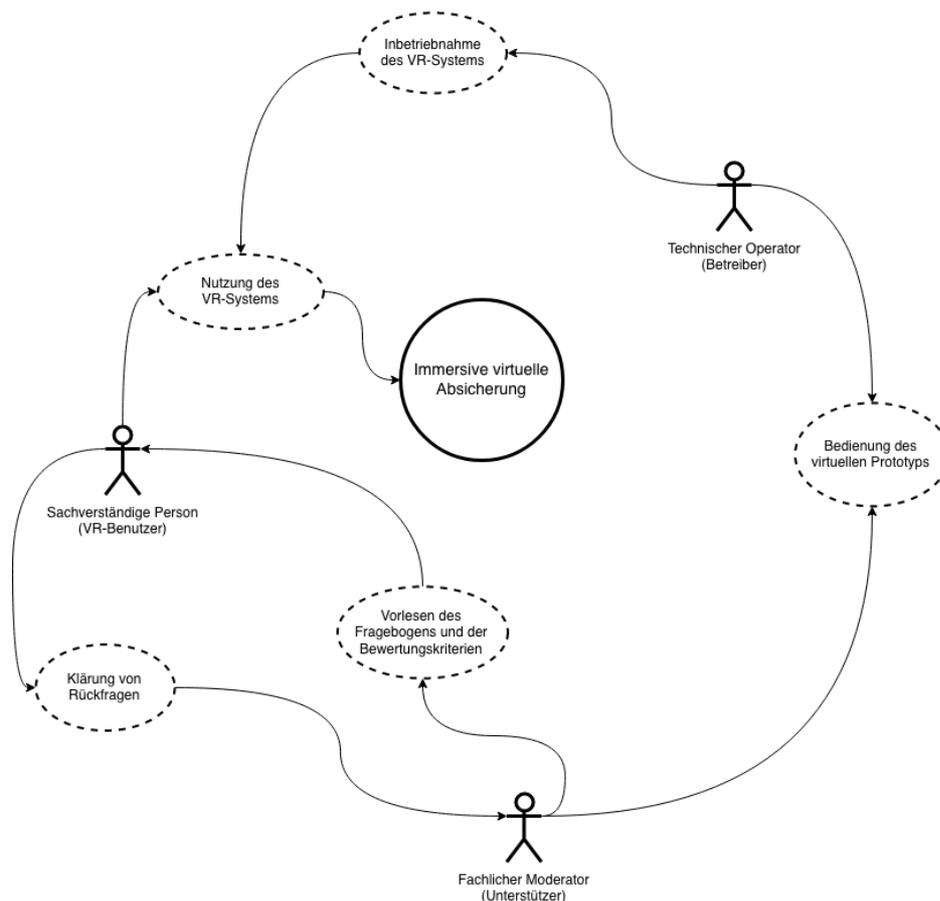


Abbildung 20: Akteure und deren Aufgaben bei einer immersiven Innenraumabsicherung. Quelle: Eigene Darstellung.

3.2 Forschungsfragen

Mit dem langfristigen Ziel der Ersetzung von physischen Prototypen durch virtuelle, war es zunächst wichtig zu verstehen, welche Faktoren diesem Ziel im Wege stehen. Denn obgleich virtuelle Prototypen bereits seit mehreren Jahrzehnten zum

Einsatz kommen (Zimmermann, 2001), ist in der Automobilliteratur nach wie vor häufig das sinngemäße Fazit zu finden, dass die Technik zwar vielversprechend, jedoch nicht praxistauglich sei (Braess, 2012, S. 928; Hans Dieter Futschik, 2012, S. 87; Thomas Herpel & Peer-Oliver Wagner, 2012, S. 453; Widmann, 2012, S. 889).

Um ein besseres Verständnis davon zu bekommen, welche praktischen Gründe nach wie vor dazu führen, dass teure physische Prototypen aufgebaut und flexible virtuelle gemieden werden, wurden folgende Forschungsfragen untersucht.

F1: Welche Faktoren spielen eine Rolle bei der Beurteilung von virtuellen und realen Fahrzeugprototypen aus Anwendersicht?

F2: Welche aktuellen Problemfelder gibt es in der Fahrzeuginnenraumbeurteilung anhand von virtuellen Prototypen aus Anwendersicht?

Ziel der Untersuchung war es, die Sichtweisen derjenigen Fachkräfte zu rekonstruieren, die mit immersiven virtuellen Prototypen arbeiten, um daraus mögliche Forschungslücken für folgende empirische Arbeiten abzuleiten.

3.3 Methode

Das folgende Kapitel beschreibt das Untersuchungsdesign (3.3.1), den zum Einsatz gekommenen Interviewleitfaden und seine Konstruktion (3.3.2), das Stimulusmaterial und die Apparatur (3.3.3), die Rekrutierung der Teilnehmenden (3.3.4) und die resultierende Stichprobe (3.3.5) sowie die Durchführung der Untersuchung (3.3.6) und die Datenanalyse (3.3.7).

3.3.1 Design

Aufgrund des vorexperimentellen und anwendungsbezogenen Kontexts wurde eine qualitative Vorstudie im Feld durchgeführt. Die in der Feldstudie mittels halbstrukturierter Interviews erhobenen Daten dienten zur Generierung von Hypothesen der fortfolgenden empirischen Studien dieser Arbeit.

Das Interview ist eine Form der Befragung, bei der das subjektive Erleben zeitnah und in einer alltagsnahen Methode abgefragt werden kann (Döring & Bortz, 2016, S. 356 ff.). Das halbstrukturierte Interview ist für die Untersuchung der Forschungsfragen besonders gut geeignet, da es grobe Themenblöcke sowie einige Leitfragen

vorgibt, um die Vergleichbarkeit der Interviews untereinander herzustellen und den Befragten gleichzeitig die Möglichkeit einräumt, flexibel in eigenen Worten auf die Fragen einzugehen (Döring & Bortz, 2016, S. 358).

Die Interviews wurden per Audioaufzeichnung vollständig dokumentiert und anschließend für die Auswertung wörtlich transkribiert.

3.3.2 Konstruktion des Interviewleitfadens

Zur Erhebung der Daten wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Dieser beinhaltete die drei Themenblöcke *virtuelle Sitzkiste als Bewertungswerkzeug* (3.3.2.1), *immersive Darstellung eines virtuellen Fahrzeugs* (3.3.2.2) sowie *subjektives Erleben von realen Fahrzeugen* (3.3.2.3), die im Folgenden erläutert werden.

3.3.2.1 Virtuelle Sitzkiste als Bewertungswerkzeug

Im ersten Themenblock wurde die *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) als Bewertungswerkzeug im Beurteilungsvorgang sowie das Selbstverständnis der Bewertenden behandelt. Hierzu wurden für diesen Themenblock vier Leitfragen erarbeitet. Zusätzlich wurden für jeden Themenblock mehrere Hilfsfragen erarbeitet, die bei Bedarf gestellt wurden, um detailliertere Anmerkungen zu erhalten.

Die *erste Leitfrage* forderte die Befragten auf, in eigenen Worten die Kernpunkte ihrer Tätigkeit in der zuvor stattgefundenen Fahrzeugbeurteilung zu beschreiben.

Als Hilfestellung wurden sie bei Bedarf im Detail danach gefragt, welche Aspekte der Fahrzeuge sie aus eigener Sicht geprüft und bewertet hatten und wie sie in der Beurteilungssituation damit umgingen, wenn sie erfuhren, dass der Datenstand der physischen Prototypen in der Bewertung nicht mehr aktuell war.

Das Ziel war es zu erfahren, ob die *virtuelle Sitzkiste* von den Bewertenden als Beurteilungswerkzeug verstanden wurde und ob das Potential der virtuellen Darstellung gegenüber den physischen Prototypen für den Beurteilungsprozess bekannt war.

Bei der *zweiten Leitfrage* wurden sie gebeten, ihren persönlichen Eindruck vom Beurteilungsvorgang zu beschreiben. Hierbei ging es um die Erörterung der positiven und negativen Eigenschaften der virtuellen Sitzkiste als Bewertungswerkzeug.

Als Hilfestellung sollten sie bspw. beschreiben, welche Aspekte ihnen besonders im Gedächtnis geblieben waren, was sie sich im Vorfeld anders vorgestellt hatten und was sie bei der Beurteilung vermisst hatten. Weiterhin sollten sie sowohl positive als auch negative Gesichtspunkte der virtuellen Beurteilung schildern, die ihnen besonders im Gedächtnis geblieben waren.

Diese Leitfrage zielte darauf ab, die positiven und negativen Besonderheiten der virtuellen Sitzkiste herauszuarbeiten.

Die *dritte Leitfrage* fragte nach den besonders wichtigen „Beanstandungen aus Kundensicht“ aus der Sicht der Befragten.

Zur Hilfestellung wurde gefragt, worauf sie bei der Beurteilung speziell achten würden und wie gut sie die hierbei genannten Aspekte virtuell beurteilen konnten.

Das Ziel dieser Frage war es zu sammeln, welche Beurteilungskriterien von Bewertern als besonders wichtig erachtet wurden und ob die *virtuelle Sitzkiste* für die Beurteilung dieser geeignet war.

Bei der *vierten Leitfrage* wurden die Befragten gebeten, an einen Mietwagen zu denken und zu beschreiben, welche Elemente sie darin für eine komfortable, lange Fahrt auf ihre individuellen Bedürfnisse einstellen würden.

Bei Bedarf einer Hilfestellung wurde nachgefragt, ob sie die in der vorhergehenden Leitfrage genannten Aspekte in der virtuellen Sitzkiste individuell einstellen konnten und ob sie dies vor der virtuellen Beurteilung getan hatten.

3.3.2.2 Immersive Darstellung eines virtuellen Fahrzeugs

Der zweite Themenblock des Interviewleitfadens deckt die *Erlebbarkeit des Fahrzeugs in der virtuellen Sitzkiste* ab.

Die Leitfrage hierzu forderte die Bewertenden auf, in eigenen Worten zu beschreiben, wie sie das virtuelle Fahrzeug empfanden.

Im Bedarfsfall wurde als Hilfestellung nachgefragt, was den Bewertenden im Vergleich zu einem echten Fahrzeug fehlte oder was sie bei der virtuellen Darstellung besonders überraschte. Weiterhin wurde nach den Defiziten sowohl von der virtuellen Darstellung als solche als auch von dieser im Zusammenhang mit dem Beurteilungsvorgang gefragt und auch nach Verbesserungsvorschlägen oder wün-

schenswerten technischen Änderungen. Auch ihre Vorstellung des Beurteilungsvorgangs in naher Zukunft konnte zur Anregung des Interviewflusses abgefragt werden.

Die Ziele hierbei waren zu erfahren, welche Aspekte von virtuellen Modellen derzeit in der immersiven Darstellung fehlen und ergänzt werden müssen, welche Vorannahmen die Bewertenden gegenüber der virtuellen Sitzkiste und der immersiven Fahrzeugdarstellung mitbringen und deren Ideen zur Verbesserung zu erfahren.

3.3.2.3 Subjektives Erleben von realen Fahrzeugen

Der dritte Themenblock adressierte *das subjektive Erleben von realen Fahrzeugen*. Hierbei sollten durch fünf Leitfragen einerseits die relevanten Aspekte für die Beurteilung von realen Fahrzeugen erfragt und andererseits jene Aspekte ergründet werden, welche mit der emotionalen Wirkung des Fahrzeugs in Verbindung gebracht werden.

Vor der *ersten Leitfrage* wurde zunächst eine fiktive Situation beschrieben, bei der ein Freund oder Bekannter die befragte Person bei der Entscheidung für oder gegen den Kauf eines Neuwagens um Hilfe bittet. Die Leitfrage lautete: „Was würden Sie ihm / ihr raten, um ein Gefühl für das Fahrzeug zu bekommen?“

Als Hilfestellung konnte nachgefragt werden, wie die Befragten sich persönlich einen Eindruck von einem Fahrzeug verschaffen, welches sie zum ersten Mal in Augenschein nehmen.

Das Ziel der Leitfrage war es zu ergründen, wie das sprichwörtliche „Gefühl für ein Auto“, das beurteilt werden soll, zustande kommt.

Bei der *zweiten Leitfrage* wurden die Befragten aufgefordert, die Worte zu benennen, mit denen sie einen Wagen beschreiben, der ihnen besonders gut gefällt.

Als Hilfestellung wurde nachgefragt, was einen Wagen ausmacht, der den Befragten besonders gut gefiele, was ihnen an ihrem aktuellen Wagen besonders gut oder am wenigsten gefällt.

Das Ziel der Frage war es zu sammeln, welche Worte, Eigenschaftsbeschreibungen oder Kategorien bei der Beschreibung von Fahrzeugen herangezogen werden. Damit sollte bspw. verstanden werden, ob sich die Beschreibung von realen Fahrzeugen von der der virtuellen unterscheidet.

Mit der *dritten Leitfrage* wurde das Interview in die Richtung Emotionalität von Fahrzeugen geleitet. Die Befragten wurden nach ihrem Traumwagen befragt.

Die Hilfestellung bot den Befragten an, sich nicht durch finanzielle oder alltags-taugliche Aspekte und auch nicht von der Marke oder dem Fahrzeugalter einschränken zu lassen. Weiterhin wurde angeregt zu beschreiben, was ein solches Fahrzeug zum absoluten Traumwagen mache.

Durch diese Leitfrage sollten die Worte, Eigenschaften und Kategorien erarbeitet werden, mit denen die Befragten ein aus ihrer Sicht optimales Fahrzeug beschreiben. Daraus ließe sich bspw. ableiten, ob und welche Faktoren für eine virtuelle Beurteilung wichtig sind, die nichts mit den Kernpunkten der Beurteilung jedoch mit einem Fahrzeug zu tun haben könnten.

In der *vierten Leitfrage* wurde nach dem stärksten Gefühl gefragt, welches die Befragten mit ihrem ersten Auto verbinden.

Als Anregung wurden im Bedarfsfall nachgefragt, ob die Befragten sich an besondere Momente aus ihrem Leben erinnern würden, die sie mit ihrem ersten Auto verbinden würden.

Ziel war es zu verstehen, in welchen Worten Emotionalität zu dem eigenen Fahrzeug geäußert wird, um ggf. im Umkehrschluss zu verstehen, wie ein virtuelles Fahrzeug emotional in Szene gesetzt werden könnte.

Als finale, *fünfte Leitfrage* sollten die Befragten einschätzen, welche emotionalen Aspekte verschiedene Fahrzeuge und Marken voneinander abgrenzen.

Hilfsweise wurde angeregt, an Eigenschaften zu denken, die mehr mit dem persönlichen Geschmack zusammenhängen als mit einer Marktanalyse oder Ähnlichem.

Auch hinter dieser Frage steckte das Ziel, Eigenschaften und Kategorien zu erarbeiten, mit denen die Befragten ein aus ihrer Sicht optimales Fahrzeug beschreiben, um daraus abzuleiten, ob und welche Aspekte für eine virtuelle Fahrzeugbeurteilung wichtig sind.

3.3.3 Apparatur und Stimulusmaterial

Die Interviews erfolgten unmittelbar im Anschluss an eine Fahrzeugbeurteilung, die von den Befragten in der *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) an einem virtuellen Fahrzeugprototyp durchgeführt wurden. Ergänzend zur virtuellen Darstellung

standen den Beurteilenden auch ein *Hardware-Mock-Up* (sog. Ergonomie-Sitzkiste) sowie mehrere, sich bereits auf dem Markt befindliche Vergleichsfahrzeuge zur Verfügung.

Bei dem im Vordergrund der Beurteilung stehenden Fahrzeug handelte es sich um den Volkswagen Tiguan (Markteinführung/Modell 2016) in einer frühen Entwicklungsphase. Dieses Fahrzeugmodell wurde ebenfalls in den später folgenden quantitativen Studien dieser Arbeit verwendet.

Die softwareseitige Erzeugung des in der *virtuellen Sitzkiste* immersiv dargestellten Fahrzeugs erfolgte zum Zeitpunkt der Datenerhebung mithilfe der Software RTT DeltaGen 11 unter Zuhilfenahme der Module *RTT Scale* and *RTT Immersive*. Das Softwarepaket lief dabei auf einem Render-Cluster basierend auf drei Dell Precision T7600 Workstations, ausgestattet mit je zwei Intel Xeon E5-2687W 3,8 GHz Prozessoren; 256 GB RAM und zwei Nvidia Quadro 6000 Grafikkarten. Als Betriebssystem kam Windows 7 Enterprise SP1 (64Bit) zum Einsatz. Die relative Position und Rotation des HMDs sowie zusätzlicher Interaktions-Devices wurden mithilfe eines optischen Infrarot-Trackingsystems (ARTTRACK2 mit 12 Kameras) erfasst und über eine Ethernet-Verbindung an das Render-Cluster weitergegeben.

3.3.4 Rekrutierung

Die Rekrutierung der Befragten erfolgte im Rahmen einer laufenden Fahrzeugbeurteilung im Zeitraum vom 9. bis 13. Dezember 2013. Hierbei wurden die Teilnehmer unmittelbar im Anschluss an eine durchgeführte Beurteilung eines Fahrzeugs in der *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) angesprochen und gefragt, ob sie sich bereit erklären würden, an einem Interview zum Thema *virtuelle Beurteilung von Prototypen* teilzunehmen, mit dem Ziel, bei der Verbesserung von Prozess und Technik mitzuwirken. Für die Teilnahme an den Interviews wurden keine Incentives in Aussicht gestellt oder ausgeteilt. Unter den genannten Randbedingungen wurde eine *gezielte homogene* Stichprobe rekrutiert.

3.3.5 Stichprobe

Die Stichprobe $N = 12$ bestand aus vier Frauen und acht Männern im Alter von 25 bis 51 Jahren ($M = 37.92$, $SD = 9.26$). Es handelte sich dabei um eine interdisziplinäre Gruppe von projektbeteiligten Fahrzeugexperten. Vier teilnehmende Personen

führten vor dem Interview ihre erste virtuelle Fahrzeugbeurteilung durch. Insgesamt verfügten fünf der Befragten über Vorerfahrungen mit 3D-Darstellungen durch die Arbeit oder im Privatleben. Vier der befragten Personen verwendeten das HMD während der virtuellen Fahrzeugbeurteilung in Verbindung mit einer Brille. Eine vollständige Auflistung der Merkmalshäufigkeiten in der Stichprobe kann Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1

Übersicht der Merkmalshäufigkeiten innerhalb der Stichprobe (N = 12)

Merkmal	n	%
Geschlecht		
männlich	8	67
weiblich	4	33
Alter zum Befragungszeitpunkt (in Jahren)		
< 26	1	8
26–30	4	33
31–35	0	0
36–40	0	0
41–45	4	33
46–50	2	17
51–55	1	8
Höchster Bildungsabschluss		
Ohne Schulabschluss	0	0
Schulabschluss (z.B. Haupt-, Real-, Gymnasialabschluss)	0	0
Abgeschlossene Berufsausbildung (nach Lehre oder Berufsfachschule)	0	0
Techniker(-in), Meister(-in), Fachwirt(-in)	1	8
Hochschulabschluss	9	75
Nicht angegeben	2	17
Vorerfahrungen		
3D-Spiele, 3D-Filme	5	42
Virtual Reality	2	17
Augmented Reality	1	8
Computersimulation	3	25
CAD, DMU, Konstruktion	3	25
Sitzkisten	9	75
Virtuellen Sitzkisten	8	67
Beurteilung von Prototypen oder Konzeptfahrzeugen	7	58
Virtuelle Fahrzeugabsicherung	8	67
Sonstige		
Verwenden einer Sehhilfe	4	33
Erste Teilnahme an einer virtuellen Fahrzeugabsicherung	4	33

Anmerkung. Aufgrund von Rundungen können sich bei prozentualen Angaben geringfügige Abweichungen ergeben.

3.3.6 Untersuchungsdurchführung

Nach erfolgreicher Rekrutierung (3.3.4) wurden die Interviewteilnehmerinnen und -teilnehmer zu einer Besprechungsecke geführt. Diese befand sich im gleichen

Raum wie die *virtuelle Sitzkiste* und weitere Fahrzeugprototypen und bot durch aufgebaute Trennwände sowohl eine visuelle als auch akustische Abschirmung von den übrigen Personen im Raum. Dort lagen die Interviewmaterialien wie Leitfaden, Aufnahmegerät sowie Vordrucke mit der Einverständniserklärung bereit. Weiterhin.

3.3.6.1 Begrüßung und Aufklärung der Teilnehmenden

Nachdem der Interviewer und die interviewte Person Platz genommen hatten, dankte der Interviewer zunächst für die Bereitschaft zur Teilnahme und klärte die teilnehmenden Personen mündlich und standardisiert über die Rahmenbedingungen der Untersuchung auf. Hierzu teilte der Untersuchungsleiter standardisierte Instruktionen aus (Anhang C). Dabei wurde das Thema der Untersuchung erläutert. Zur Sicherung der Forschungsethik (Döring & Bortz, 2016, S. 123 ff.) wurden die Teilnehmenden darin über ihre Rechte und den Umgang mit erhobenen Daten aufgeklärt und gaben im Anschluss schriftlich eine informierte Einwilligung in die Untersuchungsteilnahme sowie in die Audioaufzeichnung der Interviews zwecks späterer Transkription ab.

3.3.6.2 Durchführung des Leitfadeninterviews

Der Einstieg in die Durchführung des Interviews erfolgte, indem die interviewte Person gebeten wurde, in eigenen Worten ihre Rolle bei dem stattgefundenen Beurteilungsvorgang zu beschreiben. Anschließend wurden die Befragten gebeten, jene Aspekte des Fahrzeugs zu benennen, die besonders im Fokus ihrer Beurteilung lagen.

Der weitere Interviewverlauf erfolgte teilstrukturiert unter Zuhilfenahme des Interviewleitfadens (Abschnitt 3.3.2). Die Dauer der Interviews lag zwischen 13–30 min ($M = 18:15$ min; $SD = 4:49$).

3.3.6.3 Abschlussgespräch

Waren die Themenblöcke des Leitfadens abgearbeitet, bedankte sich der Interviewer und fragte, ob es weitere Anmerkungen zum Thema gäbe, die noch nicht angesprochen worden seien. War dies der Fall, wurden sie entsprechend besprochen, anderenfalls erfolgte die Verabschiedung von den Interviewten.

3.3.7 Datenanalyse

Die Audioaufzeichnungen der Interviews wurden wörtlich transkribiert und mittels der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) ausgewertet.

Aufgrund der in der Untersuchung geschilderten persönlicher Daten (Tätigkeit, erstes eigenes Fahrzeug, etc.) und der Stichprobengröße von zwölf Teilnehmenden ergab sich ein besonderer Anspruch an die Anonymisierung der Daten.

Zur Sicherstellung der Anonymität der Interviewten wurden Namen und Tätigkeitsbereiche der einzelnen Personen, sofern genannt, aus den Transkripten entfernt und die Audioaufzeichnungen unmittelbar nach der Transkription vernichtet.

Soziodemografische Angaben wurden für die Stichprobenbeschreibung so zusammengefasst, dass kein Rückschluss auf einzelne Befragte mehr möglich ist.

3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, jene Aspekte zu identifizieren, die aus Anwendersicht als Hindernisse gegen die Ersetzung physischer Prototypen durch virtuelle sprechen. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Befunde diskutiert (3.4.1 bis 3.4.7), die methodischen Einschränkungen (3.4.8) der Arbeit dargestellt sowie ein Ausblick (3.4.9) auf weiteren Forschungsbedarf und praktische Anwendung gegeben.

3.4.1 Eingeschränktes Vertrauen in die Ergebnisse der virtuellen Fahrzeugbeurteilung

Elf der zwölf Befragten gaben an, dass sie eine klare Vorstellung davon haben, welche Aspekte sie bevorzugt in physischen Prototypen anstatt in der *virtuellen Sitzkiste* beurteilen. Dies nannten sowohl Befragte, die bereits mehrere Fahrzeugbewertungen in der *virtuellen Sitzkiste* vorgenommen hatten ($n = 7$), als auch Erst-anwenderinnen und -anwender ($n = 4$). Häufig diskutierten sie anschließend einige Pro- und Contra-Argumente für die virtuelle Darstellung, aber auch die physische.

Als Vorteile der virtuellen Darstellung gegenüber der physischen nannten sie, dass diese über eine Visualisierung ($n = 9$) von gefärbten, texturierten Materialien (bspw. Stoff, Leder etc.) verfüge und dass mehrere Varianten ($n = 5$) von Modulen

(bspw. verschiedene Ausführungen von Radio- und Navigationssystemen) dargestellt werden können. Auch die Darstellung einer Außenumgebung (bspw. einer Straßenkreuzung) mache diese Darstellung natürlicher ($n = 3$). Der physische Mock-Up hingegen böte mit seinen in einem neutralen Grau lackierten Flächen und in der Halle stehend wenig Realismus.

Als Nachteile der virtuellen Darstellung nannten einige der Befragten ($n = 6$), dass sie ihren Körper in der virtuellen Darstellung nicht sehen könnten und ihnen dies befremdlich vorkommen würde. Des Weiteren fehlte ihnen eine intuitive und sensorisch umfassendere Interaktion mit dem Fahrzeugprototyp, wie zum Beispiel eine Erreichbarkeitsbewertung ($n = 3$) von Fahrzeugelementen durch Greifen und Berühren mit der Hand ($n = 6$). Die Nutzung von natürlichen Vergleichsmaßen, wie bspw. der Größe der eigenen Hand ($n = 4$), zur Größenbewertung von Ablagen, Beurteilung der Kopffreiheit durch aufrechtes Hinsetzen und dem Nichtvorhandensein einer haptischen Rückmeldung ($n = 11$) wurde vermisst. Die Beurteilung von Arm-
auflagen ($n = 2$) und Beinanlagen ($n = 3$) wurde mehrfach als nicht durchführbar genannt. Die generelle Beurteilung von Größen ($n = 3$) und des Raumgefühls ($n = 2$) wurde im physischen Prototyp als intuitiver beschrieben.

Die Auswertung der Aussagen zeigte weiterhin, dass die Beurteilung des gleichen virtuellen Fahrzeuginnenraums teilweise zu unterschiedlichen berichteten Eindrücken führte oder von den Interviewten hinterfragt wurde. Während eine Person die Ablagen als „größer oder tiefer“ als im physischen Aufbau empfand, berichtete eine andere Person, sie tendenziell als kleiner empfunden zu haben als im physischen Aufbau, konnte dies jedoch nicht abschließend zweifelsfrei für sich beantworten.

3.4.2 Keine haptischen Eindrücke im virtuellen Fahrzeug

Ein weiterer von der Mehrheit der Interviewten ($n = 11$) genannter Aspekt war die mangelnde haptische Erlebbarkeit des virtuellen Fahrzeugs. Wie im vorhergehenden Abschnitt (3.4.1) beschrieben, kam es hierbei einerseits zu direkten Nennungen, bei denen dies explizit für die *virtuelle Sitzkiste* bemängelt oder gewünscht wurde, andererseits wurde dies indirekt über die Vorteile eines physischen Prototyps formuliert und für diesen als Vorteil gegenüber der virtuellen Prototypdarstellung genannt.

Der Umfang gewünschter oder in physischen Prototypen vorhandener haptischer Erlebbarkeit wurde hierbei von „lässt sich anfassen“ bis hin zum komplexen haptischen Erleben von Materialien und Oberflächenbeschaffenheit sowie Größen von Ablagen bzw. des Raumgefühls beschrieben. Einige Innenraumeigenschaften wie Ein- und Ausstiegscomfort, Comfort von Armauflagen sowie Beinlagen und die Beurteilung der Kopffreiheit konnten laut den Aussagen der Befragten nur im physischen Prototyp beurteilt werden.

Ogleich die Spannweite der inhaltlich beschriebenen haptischen Beurteilungseigenschaften sehr breit war und von unkonkret bis hin zu detailliert reichte, wurde die Relevanz und der Vorteil einer haptischen Erlebbarkeit von einer deutlichen Mehrheit der Befragten genannt und verstärkt diskutiert.

3.4.3 Durch virtuelle Innenraumbeurteilung verursachte Cybersickness-Symptome

Darüber hinaus zeigte die Datenauswertung, dass die Fahrzeugbeurteilung in der *virtuellen Sitzkiste* bei neun von zwölf Befragten unerwünschte Nebenwirkungen verursacht hat. Die berichteten Beschwerden wurden den Symptomen von *Cybersickness* (Abschnitt 2.1.4) zugeordnet (Tabelle 2).

Tabelle 2

Von den Befragten während oder nach der virtuellen Beurteilung empfundene Nebenwirkungen (N = 12)

Genanntes Symptom (ohne Schwere des Auftretens)	n	%
Übelkeit (auch „schlecht sein“ und „flau im Bauch“)	2	16,67
Schwindel	5	41,67
Unwohlsein	2	16,67
Kopfschmerzen	2	16,67
Probleme beim Fokussieren	2	16,67
Überanstrengung der Augen	1	8,33
Ermüdung der Schulter und Nackenmuskulatur	1	8,33
Probleme mit der Konzentration	1	8,33

Anmerkung. Aufgrund von Rundungen können sich bei prozentualen Angaben geringfügige Abweichungen ergeben.

Zwei Befragte gaben ergänzend an, dass sie aufgrund der auftretenden Symptome versuchen würden, die Dauer des Beurteilungsvorgangs in der *virtuellen Sitzkiste*

möglichst kurz zu halten. Drei weitere Personen gaben an, zwischendurch die Augen zu schließen, um Nebenwirkungen vorzubeugen.

3.4.4 Einschränkung der Fahrzeugbeurteilung durch die Verwendung eines Head-Mounted-Display

Das in der *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) zum Einsatz kommende Head-Mounted-Display (HMD) wurde von allen Befragten ($n = 12$) hinsichtlich mehrerer Aspekte als eingeschränkt nutzbar für die virtuelle Beurteilung von Fahrzeugen beschrieben. Die Kritik der Befragten kann in die Kategorien *Tragekomfort* und *Darstellungsleistung* unterteilt werden.

Hinsichtlich des *Tragekomforts* war das hohe Gewicht der größte Kritikpunkt ($n = 6$) am HMD. Mit seinen 1,05kg stellt das HMD eine zusätzliche, ungewohnte Masse am Kopf der Benutzenden dar. Wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, kann ein derartiges Gewicht bei untrainierten Menschen zur schnelleren Ermüdung der Nackenmuskulatur und zu einer unnatürlichen Körperhaltung führen (Knight & Baber, 2007). Solche Ermüdungserscheinungen könnten bspw. dazu führen, dass die virtuelle Fahrzeugbeurteilung vorzeitig abgebrochen wird oder das Fahrzeug aus einer unnatürlichen, durch die Körperhaltung bedingten Perspektive heraus durchgeführt wird und zu verfälschten Ergebnissen führt.

Bei der Verwendung in einem Sitzszenario (bspw. Fahrzeuginnenraumbewertung) kollidiert das Kabel mit der Sitzlehne und schließt bei Fahrzeugsitzen die Verwendung einer Kopfstütze aus (Abbildung 21). Das am Sitz reibende Kabel führt (zusätzlich zum hohen Gewicht des HMDs) zur Einschränkung der natürlichen Bewegungsfreiheit der tragenden Person. Weiterhin kann die auftretende Zugbelastung bei Drehungen des Kopfes zum Verrutschen des HMDs auf dem Kopf der Person führen. Ein starkes Verrutschen würde hierbei in der Regel bemerkt und das HMD eigenständig geradegerückt werden. Bei schwachem, unbemerktem Verrutschen hingegen würde das HMD während des restlichen Beurteilungsvorgangs schief verbleiben und könnte Cybersickness-Symptome hervorrufen (Bonato, Bubka & Palmisano, 2009; Keshavarz & Hecht, 2011; Lo & So, 2001; So & Lo, 1999; So, Ho & Lo, 2001). Eine andere Reaktion könnte sein, dass die Person eine für sie unnatürliche Körperhaltung einnimmt, um dem Verrutschen entgegenzuwirken (Knight & Baber, 2007).

Auch die nach unten gerichtete Kabelführung des HMDs, wie in Abbildung 21 zu sehen, wurde durch die Befragten ($n = 4$) kritisiert. Das verwendete HMD wurde ursprünglich für militärisches Training entwickelt (NVIS, Inc., 2010) und ist für die Nutzung im Stehen ausgelegt. Der nach unten abgehende Kabelstrang (bestehend aus zwei HDMI-Video-, einem Audio- und einem Stromversorgungskabel) dient hierbei als Gegengewicht zum vorwiegend im Frontbereich wirkenden Gewicht des HMDs.



Abbildung 21: Kabelführung des in der Untersuchung verwendeten NVIS nVisor ST50 Head-Mounted-Displays. Quelle: Eigene Darstellung.

Ein weiterer, seltener aufgetretener Kritikpunkt an den Tragekomfort des HMDs war die teilweise unzureichende Einstellmöglichkeit des Kopfbandes. Bei Personen mit einem Kopfumfang unterhalb des minimal einstellbaren Umfangs verrutschte das HMD regelmäßig, sodass einige nicht in der Lage waren, an der Bewertung teilzunehmen oder gezwungen waren, das HMD mit den Händen zu stützen. Personen mit einem Kopfumfang größer des maximal einstellbaren Umfangs konnten überhaupt nicht an der Fahrzeugbewertung teilnehmen.

Hinsichtlich der *Darstellungsleistung* kritisierten die Befragten ($n = 3$) die zu geringe Auflösung, sichtbare Doppelbilder ($n = 5$) oder Nachziehen des Bildes bei

Kopfdrehung ($n = 2$) sowie das zu kleine Gesichtsfeld (Field-of-View) des HMDs ($n = 3$). Während die geringe Auflösung als geringfügig hinderlich eingestuft wurde, störten sich einige der Befragten an Problemen mit der Fokussierung, was sie als Auftreten von Doppelbildern beschrieben. Dieses Problem kann auf die fehlende individuelle Kalibrierung des HMDs und der Software zurückgeführt werden, wie sie häufig in Systemen vorkommt, die für eine Vielzahl an Nutzern auf einen mittleren Wert kalibriert werden (Mon-Williams, Warm & Rushton, 1993). Die hierbei auftretenden Schwierigkeiten mancher Nutzer zu fokussieren, können zu einer Überanstrengung der Augen und somit zu Cybersickness führen (Abschnitt 2.1.4).

Durch das im Vergleich zur Realität sehr kleine Gesichtsfeld oder die Abschottung durch das HMD von der Außenwelt kam der dargestellte Fahrzeuginnenraum zwei Befragten sehr beengend vor. Erstbenutzende realisierten zum Teil nicht, dass sie sich frei im Innenraum umsehen konnten, bis dies von einem Moderator vorgeschlagen wurde. Söderman (2005) beschreibt ein ähnliches Verhalten der Nutzer unter vergleichbaren Versuchsbedingungen.

Eine der befragten Personen berichtete, dass sie bei der Erreichbarkeitsbeurteilung des Sicherheitsgurtes ihren Kopf sehr viel stärker drehen musste, um den Sicherheitsgurt (visuell) aufzufinden. Das Greifen nach dem Sicherheitsgurt fühlte sich im Vergleich zu einem realen Fahrzeug unnatürlich an und sorgte für ein unangenehmes Ziehen in der Nackenmuskulatur. Dieser Umstand kann auf das kleine horizontale Gesichtsfeld des HMDs zurückgeführt werden.

Weitere Probleme treten auch bei einer vertikalen Einschränkung des Gesichtsfeldes durch das HMD auf. Voss (2008) vermutet, dass ein geringes vertikales Gesichtsfeld dazu führt, dass das Raumgefühl in einem virtuellen Fahrzeuginnenraum falsch eingeschätzt wird, da die Betrachtenden nicht in der Lage sind, die gewölbte Form des Dachhimmels beim Blick nach vorne wahrzunehmen. Stattdessen würden sie die vordere Dachkante sehen und davon ausgehen, dass der Dachhimmel einen geringeren Abstand zu ihrem Kopf hätte, als dies tatsächlich der Fall sei.

Es ist nicht auszuschließen, dass die durch die Einschränkungen des Gesichtsfeldes entstehenden unnatürlichen Kopfbewegungen ein Auftreten von Cybersickness-Symptomen hervorrufen.

3.4.5 Selbstverständnis von Fahrzeugexperten bei einer “Beurteilung aus Kundensicht”

Ein unerwarteter Nebenbefund war das Rollenselbstverständnis der Fahrzeugexperten bei der durchgeführten Fahrzeugbeurteilung. Eines der Ziele, mit denen frühe Beurteilungen von Fahrzeugprojekten durchgeführt werden, ist es, kundenrelevante Beanstandungen frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Im vorliegenden Fall wurden die Befragten zu einer „Beurteilung des Fahrzeugs aus Kundensicht eingeladen“.

Zu Beginn des Interviews wurden die befragten Männer und Frauen gebeten, ihre Rolle innerhalb des stattgefundenen Beurteilungsvorgangs zu beschreiben.

Sechs der zwölf Befragten verwendeten in ihrer Beschreibung die Wortwahl „(. . .) aus Kundensicht“. Das Interview wurde anschließend mit den Aspekten des Beurteilungsvorgangs fortgesetzt. Im späteren Verlauf des Interviews wurden die Befragten gebeten, die aus ihrer Sicht für den Endkunden wichtigen Beurteilungsaspekte zu benennen. Das Ziel der Leitfrage lag darin zu sammeln, welche Kriterien die *virtuelle Sitzkiste* als Beurteilungswerkzeug erfüllen muss, um kundenrelevante Beanstandungen abzusichern. Entgegen der Erwartung nannten die meisten der Befragten die Aspekte „aus Kundensicht“ als besonders relevant, mit denen sie beruflich betraut waren. Sie befassten sich nach eigenen Angaben in der Beurteilung häufig mit Detailaspekten (bspw. der Lesbarkeit von Symbolen auf bestimmten Bedienelementen). Als sie im weiteren Interviewverlauf gebeten wurden sich vorzustellen, dass sie jemanden aus dem Bekanntenkreis beim Autokauf beraten sollen, nannten sie überwiegend holistische, nicht fachspezifische Alltagsszenarien, die die fiktive Person zum Testen durchführen sollte („reinsetzen und Probefahrt machen, am besten übers Wochenende“ oder „mit dem Auto mal Einkaufen fahren“).

Das Ergebnis deutet darauf hin, dass Fachexperten, obwohl sie von sich annehmen, aus Kundensicht zu beurteilen, während eines Beurteilungsvorgangs unbewusst in ihre Fachrolle zurückkehren und möglicherweise den spezifischen Details zugewandt sind, die sie in ihrem Berufsalltag bearbeiten. Die vorgeschlagenen Alltagsszenarien, mit denen ein fiktiver Endkunde ein Fahrzeug prüfen sollte, wurden von ihnen weder für die virtuelle Beurteilung als wichtig noch in der *virtuellen Sitzkiste* als fehlend genannt.

Das Ergebnis legt nahe, dass Experten, die Produkteigenschaften aus Kundensicht beurteilen sollen, möglicherweise unbewusst aus einem anderen Gesichtspunkt heraus beurteilen und hierbei eher auf spezifische Details achten als auf Nutzungsszenarien, die sie bei Kunden vermuten.

3.4.6 Falsche Beurteilungsperspektive aufgrund falscher Sitzposition

Obgleich die *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) die gleichen grundlegenden Elemente eines Fahrerplatzes (Sitz, Lenkrad, Pedalerie) enthielt, zeigte sich, dass Benutzerinnen und Benutzer mit ihr verschieden umgehen als mit einem physischen Fahrzeugprototyp. Während sie beim Einsetzen in den physischen Prototyp zunächst einmal Sitz- und Lenkradposition an ihre individuellen Bedürfnisse anpassten, wie sie dies in einem Fahrzeug vor Fahrtantritt getan hätten, konnte beim Einsetzen in die *virtuelle Sitzkiste* vereinzelt beobachtet werden, dass die Anpassung dieser Einstellungen nicht vorgenommen wurde.

Basierend darauf, dass die *virtuelle Sitzkiste* im Vorfeld einer Beurteilung mittels einer präzisen Vermessung auf die Konstruktionsmaße des zu beurteilenden Fahrzeugs eingestellt wird, entscheidet die Sitzposition (da sie die Kopfposition beeinflusst) darüber, aus welcher Position und mit welcher Rotation der Bildausschnitt für die Anzeige im HMD berechnet wird. Daraus ergab sich, dass eine nicht individuell angepasste Sitzposition in der *virtuellen Sitzkiste* dazu führte, dass das virtuelle Fahrzeug nicht aus der für die nutzenden Personen gewohnten Perspektive beurteilt wurde.

In der Praxis konnte bspw. beobachtet werden, dass Personen mit der Beurteilung des Innenraums beginnen wollten, obwohl ihre Füße nicht an die Pedale heranreichten. Dies kommt vor, wenn bspw. eine sehr große Person vor ihnen bewertet und den Sitz ganz nach hinten verschoben hatte. In solchen Fällen lag es in der Verantwortung des *Moderators* (Abschnitt 3.1.4), die beurteilende Person darauf aufmerksam zu machen, sich den Sitz und das Lenkrad so einzustellen wie im physischen Fahrzeug vor Fahrtantritt. Eine der befragten Personen gab im Interview an, dass sie die Einstellung von Sitz und Lenkrad ohne HMD als nicht optimal empfand. Sie schlug vor, die Sitz- und Lenkradeinstellung erst dann vorzunehmen, „(. . .) wenn man die virtuelle Ansicht hat“.

Dieses zunächst trivial erscheinende Problem zeigt zwei sehr wichtige Aspekte bei der Beurteilung von virtuellen Prototypen in vergleichbaren Darstellungssystemen wie der hier genutzten *virtuellen Sitzkiste* auf. Es schien so, als nahmen beurteilende Personen die *virtuelle Sitzkiste* nicht als Fahrzeug wahr und machten somit keinen Gebrauch von elementaren Einstellmöglichkeiten der verbauten Serienkomponenten, wie sie in nahezu jedem realen Fahrzeug gegeben sind. Daraus ergaben sich mitunter für die Person unnatürliche bzw. falsche Bildperspektiven, aus denen die Beurteilung stattfand. Im Fall der gegebenen *virtuellen Sitzkiste* erfolgte diese Einstellung in der Regel noch vor dem Aufsetzen des HMDs. Die beurteilende Person sah demnach nur die Versuchsanordnung (siehe Abbildung 13, S. 26) vor sich, die sie möglicherweise nicht stark genug an ein Fahrzeug erinnerte, um intuitiv damit zu beginnen, individuelle Einstellungen vorzunehmen. Es bedarf demnach eines systematischen Hinweissystems oder eines Kontrollmechanismus, da anderenfalls unter diesen Umständen erhobene Beurteilungsergebnisse verfälscht sein können.

Zum anderen fehlte den beurteilenden Personen eine Avatardarstellung, anhand derer sie nach Aufsetzen des HMDs feststellen konnten, dass bspw. die eigenen Füße nicht an die Pedale heranreichten.

Die Untersuchung von Lorenz et al. (2008) zeigt hierzu, dass sich unterschiedliche Sitzpositionen ergeben können, abhängig davon, ob die Einstellung des Sitzes vor oder nach dem Aufsetzen des HMDs vorgenommen wird. Auch der Einfluss des geringen FOV auf die Einschätzung der eigenen Distanz (Creem-Regehr, Willemsen, Gooch & Thompson, 2003) zum Armaturenbrett könnte Benutzerinnen und Benutzer daran hindern, eine für die eigene Person unnatürlich eingenommene Sitzposition eigenständig zu erkennen.

3.4.7 Inkonsistente Framerate durch unzureichende Systemleistung oder zu komplexe Daten

Während die visuelle Qualität der virtuellen Fahrzeugdarstellung von den Interviewten als "sehr beeindruckend" beschrieben wurde (z.B. die fotorealistische Darstellung der Narbung der Ledermaterialien), galt dies nicht für die Darstellungsleistung, insbesondere die Framerate (dt.: Bildwechselfrequenz), und die Reaktionszeit des VR-Systems. Diese wurden überwiegend als unzureichend berichtet.

Der Grund für die „Trägheit“ der Bildberechnung des VR-Systems ist in der Komplexität der dargestellten 3D-Daten zu vermuten. Die während der virtuellen Beurteilung verwendete 3D-Szene beinhaltete neben dem zu beurteilenden Fahrzeug (inkl. Innen- und Außendarstellung) zusätzlich das Vorgängermodell des Fahrzeugs sowie eine in 3D modellierte fotorealistische Straßenumgebung. Insgesamt bestand die Szene aus circa 62 Millionen Polygonen.

Selbst unter der Verwendung verschiedener Optimierungsfunktionen der verwendeten Software RTT DeltaGen wie *Occlusion Culling* oder unterschiedlichen *Level-of-Detail* (Dassault Systemes 3DExcite GmbH, 2017, S. 289, 529) sank die Framerate teilweise auf zehn Frames-per-Second (FPS). Durch die starke Gesamtauslastung des VR-Systems reagierte das System nur langsam auf Veränderungen der Blickrichtung der Benutzenden, was sowohl während des Beurteilungsvorgangs auf einem externen Monitor beobachtet werden konnte als auch während der Interviews von den Teilnehmenden genannt wurde.

Aufgrund der verschiedenen Optimierungsfunktionen der Software handelte es sich bei der genannten Bildwechselfrequenz nicht um einen konstanten, sondern einen variablen Wert, der sich aus der Datenkomplexität des aktuellen Bildausschnitts ergab. Während Szenenabschnitte mit weniger Details betrachtet wurden, reagierte das VR-System relativ dynamisch und flüssig (25+ FPS) auf Blickfeldveränderungen (durch Kopfbewegungen der nutzenden Person). Sobald jedoch mehr Details dargestellt wurden, stieg die Systemlast und Reaktionszeit und die Framerate fiel auf etwa zehn FPS.

Für die beurteilende Person hatte dies ein sich veränderndes Ansprechverhalten zur Folge. Während sie bspw. die Erreichbarkeit von Infotainment-Bedienelementen beurteilte, reagierte das System relativ flüssig (da der Bildausschnitt hierbei eine relativ simple Geometrie darstellte). Hob die Person anschließend den Kopf und wurde das zweite Fahrzeug durch die Windschutzscheibe sichtbar, begann die Darstellung zu stocken und reagierte nur noch stark verzögert auf weitere Kopfbewegungen. Einige Untersuchungen haben gezeigt, dass eine gewisse Variabilität der Bildrate zu unerwünschten Nebenwirkungen führen kann, wie sie von den Interviewten mehrfach berichtet wurden (Abschnitt 3.4.3).

Dies führt zur Diskussion eines allgemeinen Leistungsaspekts. Bei der Betrachtung von Publikationen zu immersiven virtuellen Umgebungen der letzten Jahrzehnte

fand sich häufig die sinngemäße Aussage, dass die Leistung des Systems für die jeweiligen Daten nicht ausreichend hoch war und zukünftige Systeme durch schnellere Rechner zu einer besseren Leistung führen werden. Unerwähnt blieb jedoch häufig die Tatsache, dass auch die Komplexität der darzustellenden Daten in der Praxis zunimmt. Die in der vorliegenden Studie verwendete 3D-Szene mit 62 Millionen Polygonen war zum Zeitpunkt der Durchführung verhältnismäßig groß, wurde jedoch aufgrund praktischer Anforderungen in dieser Komplexität verwendet. Verglichen mit einem Datensatz eines virtuellen Prototyps von 1996, der aus etwa 60 Tausend Polygonen bestand (Zimmermann, 2001, 2008), war die Polygonanzahl der in der Studie verwendeten Szene 300-mal so groß, während die Bildwechselfrequenz kaum gestiegen war und sich damit in etwa auf dem Leistungsniveau von 1998 bewegte (cf. Zachmann, 1998).

Die verbesserte Rechenleistung bringt zwar inzwischen eine fotorealistischere Darstellung mit sich, die in frühen Darstellungssystemen nicht möglich war, jedoch ist eine schnelle Reaktionszeit bei immersiver virtueller Darstellung ein bedeutenderer Aspekt, der stärker berücksichtigt werden sollte.

3.4.8 Methodische Einschränkungen

Obwohl die befragten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (Abschnitt 3.3.5), die an dieser Studie teilnahmen, verschiedenen Fachbereichen zugehörig waren (Marketing, Ergonomie, Akustik, Gesamtfahrzeug etc.) und somit die generelle Vielfalt der üblichen beurteilenden Personengruppe widerspiegeln, handelt es sich hierbei um eine kleine Gelegenheitsstichprobe. Die getroffenen Aussagen beziehen sich weiterhin auf den gleichen Bewertungsvorgang und das gleiche virtuelle Fahrzeug.

Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Aussagen einer Verzerrung unterliegen und dass genannte Aspekte in einer randomisierten, größeren Stichprobe und unter Einbeziehung anderer virtueller Fahrzeugprojekte mit anderen Randbedingungen (bspw. kürzerer Beurteilungsdauer in VR) zu anderen Ergebnissen führen würden.

Dennoch erscheinen die getroffenen Aussagen augenscheinlich valide und liefern einige Gründe aus Anwendersicht, die gegen den Ersatz von physischen Prototypen durch virtuelle sprechen.

3.4.9 Fazit und Ausblick

Mit dem Ziel, die Sichtweisen der Fachkräfte zu rekonstruieren, die mit immersiven virtuellen Prototypen arbeiten und daraus Forschungshypothesen für folgende empirische Arbeiten abzuleiten, wurden folgende Forschungsfragen untersucht:

F1: Welche Faktoren spielen eine Rolle bei der Beurteilung von virtuellen und realen Fahrzeugprototypen aus Anwendersicht?

F2: Welche aktuellen Problemfelder gibt es in der Fahrzeuginnenraumbeurteilung anhand von virtuellen Prototypen aus Anwendersicht?

Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehörte es, dass die Interviewten die Befürchtung äußerten, zu abweichenden Beurteilungsergebnissen gegenüber einem physischen Prototyp zu kommen, wenn sie in dem virtuellen Fahrzeug eine Beurteilung vornehmen würden (Abschnitt 3.4.1). Weiterhin nannten sie als einen der Gründe dafür, dass sie einen physischen Prototyp bevorzugen, den Umstand, dass die virtuelle Darstellung über keinerlei haptische Rückmeldung bei Beurteilungen verfügen würde (Abschnitt 3.4.2). Ein weiterer möglicher Grund dafür, dass Nutzerinnen und Nutzer zur Beurteilung im physischen Prototyp tendierten, statt sich auf die Nutzung der virtuellen Technik einzulassen, war ein möglicherweise bis dahin unterschätztes, von den Befragten angedeutetes Auftreten von *Cybersickness* (Abschnitt 3.4.3). Diese Befunde wurden als solche mit dem größten potentiellen Einfluss auf die praktische Absicherung von virtuellen Fahrzeugprototypen identifiziert und in zwei folgenden Studien vertiefend quantitativ untersucht.

Unter den weiteren Befunden fanden sich einige technische Anhaltspunkte zur Verbesserung des Darstellungssystems *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4). Hierbei wurden einige Aspekte des HMDs als zentrales Darstellungselement kritisiert, darunter das Gewicht, die Einschränkung des Gesichtsfeldes und die nicht optimale Kabelführung (Abschnitt 3.4.4). Eine weitere notwendige Verbesserung wäre die Steigerung und Stabilisierung der Darstellungsleistung bei komplexen 3D-Daten (Abschnitt 3.4.7). Es ist nicht auszuschließen, dass eine variable, sich ändernde Framerate die Ursache für *Cybersickness* sein könnte. In einer entsprechenden Forschungsarbeit könnte geprüft werden, ob und in welchem Bereich sowie über welchen Zeitraum in VR die Variabilität der Bildrate ein Prädiktor für *Cybersickness* sein könnte.

Ein letzter interessanter Nebenbefund war die Rolle, aus der Fachexperten eine Beurteilung vornahmen (Abschnitt 3.4.5). Die in der untersuchten Stichprobe beurteilenden Fahrzeugexperten waren zu einer „Bewertung aus Kundensicht“ eingeladen worden. Sie gaben im Laufe der Interviews allerdings an, dass jene Aspekte für einen Kunden besonders wichtig sind, für die sie als Fachexperten im Arbeitsalltag verantwortlich waren. Hierbei ließe sich die Validität solcher Beurteilungen grundsätzlich in Frage stellen. Da das Konzept der Bewertung aus Kundensicht universal auf andere Branchen und Produkte übertragbar ist, hätte ein diesbezüglicher Befund große Reichweite.

4 Quasi-experimentelle Laboruntersuchung: Einfluss der Display Fidelity auf die Beurteilungsergebnisse eines Fahrzeuginnenraums

Getrieben durch die Digitalisierung der Automobilindustrie nimmt die Verfügbarkeit von digitalen Daten rund um ein neues Fahrzeugprojekt stetig zu. Neben geometrischen Konstruktionsdaten, die ein Fahrzeug bis zur letzten Schraube abbilden, steigt auch die Menge verfügbarer Simulationsdaten wie bspw. Struktur- und Crashberechnungen über Gesamtfahrzeugschwingungen, Aerodynamik und Akustik (Widmann, 2012). Durch die immersive virtuelle Darstellung können solche Daten einem weiteren, interdisziplinären Personenkreis zugänglich gemacht werden. So können zum Beispiel Luftströme im Innenraum visualisiert und somit räumlich erlebbar gemacht werden (Abbildung 22).



Abbildung 22: Prinzipdarstellung der Visualisierung simulierter Luftströme in der immersiven virtuellen Umgebung. Quelle: Volkswagen AG (2017).

Neben objektiven Eigenschaften werden Fahrzeuge auch hinsichtlich der individuellen Wirkung auf den Endkunden konzipiert und müssen im Entwicklungsprozess

dahingehend bewertet werden. Dadurch ergibt sich, dass die Vorbereitung und Darstellung von Daten einem immer höheren Anspruch an die Erzeugung der subjektiven Wirkung des späteren Produktes gerecht werden muss. In den frühen Jahren von virtuellen Fahrzeugprototypen beschränkten sich die technische Machbarkeit und der Anspruch auf die Beurteilung eines dreidimensionalen Fahrzeugmodells, welches häufig an Bildschirmen oder Leinwänden dargestellt wurde. Der aktuelle Anspruch ist eine immersive virtuelle Darstellung, die die gleiche emotionale Wirkung beim Betrachtenden erzeugen soll, wie sie im späteren Serienfahrzeug erlebbar ist. Nicht zuletzt wird dieser Anspruch derzeit durch die Spieleindustrie und den wachsenden Markt für Consumer-VR-Devices verstärkt, welche zum Beispiel mit detailgetreuen, lasergescannten Innen- und Außenansichten von Fahrzeugen in Rennspielen Begehrlichkeiten wecken, jedoch nur einen Bruchteil der prototypüblichen technischen Daten flüssig darstellen müssen.

Hier stellt sich die aus Sicht der Immersionsforschung interessante Frage nach dem Vermögen der aktuellen VR-Systeme, diesem Anspruch gerecht zu werden und zu vergleichbaren Ergebnissen bei der Bewertung anhand von immersiven Prototypen mit der derzeit gegebenen *Display Fidelity* (Abschnitt 2.1.1) zu führen, wie sie mit physischen erreicht werden. Denn obgleich digitale Prototypen in der Automobilindustrie seit Jahrzehnten ihren Einsatz finden, ist deren Zuverlässigkeit als Realitätsersatz zur Beurteilung von Eigenschaften nicht ausreichend erforscht.

Ableitend aus den Ergebnissen der Vorstudie (Abschnitt 3.4) wurde eine quasi-experimentelle Laboruntersuchung durchgeführt. Das Ziel der Studie war es zu überprüfen, ob sich die Ergebnisse einer Fahrzeuginnenraumbewertung, die mittels der *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) und eines digitalen Prototyps erhoben werden, von denen eines realen Fahrzeugs unterscheiden sowie Abweichungen aufzudecken und inferenzstatistisch abzusichern.

Untersucht wurden drei in der frühen Entwicklungsphase häufig durchgeführte Beurteilungen im Fahrzeuginnenraum (*Erreichbarkeit von Bedienelementen*, *Sicht nach außen* und *Raumgefühl*). In den folgenden Abschnitten werden die der Studie zugrundeliegenden Begriffe definiert (4.1), die Forschungshypothesen (4.2) formuliert, die Untersuchungsmethode (4.3) beschrieben sowie die Ergebnisse (4.4) dargestellt und diskutiert (4.5).

4.1 Begriffsdefinitionen

„Die Auslegung eines neuen Fahrzeugs beginnt in der Regel von innen nach außen. Ausnahmen entstehen dann, wenn auf Basis eines bestehenden Fahrzeugs Anpassungen oder Derivatentwicklungen vorgenommen werden“ (Achleitner et al., 2016, S. 159). Aus diesem Grund ist die Beurteilung der in dieser Arbeit betrachteten Aspekte *Erreichbarkeit*, *Sicht nach außen* und *Raumgefühl* bereits in der frühen Konzeptentwicklung von hoher Bedeutung. „Der ‚Bauraumanspruch‘ der Insassen stellt die zentrale Anforderung an das Fahrzeug dar. So stark sich Fahrzeugkonzepte auch unterscheiden, so sind diese doch für die gleichen Menschen (5% Frau, 95% Mann als gängige Mindestanforderung) auszulegen“ (Achleitner et al., 2016, S. 159). Der Vorteil der Beurteilung von Fahrzeugeigenschaften mithilfe immersiver virtueller Realität bringt einerseits den Vorteil, eine Vielzahl an möglichen Varianten in verhältnismäßig kurzer Zeit (Zeitersparnis) virtuell aufzubauen und zu beurteilen und andererseits auf den Aufbau von kostenintensiven Hardwareprototypen (Kostensparnis) zu verzichten (Braess et al., 2016; Gomes de Sá & Zachmann, 1999; Thomke & Fujimoto, 2000; Zimmermann, 2008).

Im Folgenden werden die drei untersuchten Innenraum аспекте *Erreichbarkeit von Bedienelementen*, *Sicht nach außen* und *Raumgefühl* für die Verwendung innerhalb dieser Arbeit erläutert und definiert.

4.1.1 Beurteilung der Erreichbarkeit von Bedienelementen

Die Anordnung der Bedienelemente im Fahrzeug erfolgt in der Regel innerhalb sogenannter *funktionaler Greifräume* (Abbildung 23). Hierzu werden mithilfe von digitalen Menschmodellen Räume bestimmt, in denen Insassen eines Fahrzeugs einen *Kontaktgriff* (Drücken eines Knopfes), *Zufassungsgriff* (Dreifingergriff) oder *Umfassungsgriff* innerhalb ihrer Anatomie auf dem Sitz sitzend ausführen können (Bubb et al., 2015, S. 419 f.).



Abbildung 23: Beispiel für unterschiedliche Reichweiten einer sitzenden Person nach Art des Griffs und der daraus resultierenden Greifräume im Fahrzeugcockpit. Quelle: Bubb et al. (2015, S. 419).

Diese drei Greifräume werden für extreme anthropometrische Fahrerperzentile (sog. 5% Frau und 95% Mann) ermittelt und überlagert. In dem so entstandenen Raum befinden sich Fahrzeugflächen, auf denen prinzipiell Bedienelemente angeordnet werden können. Die Nutzung dieser Flächen schränkt sich weiter ein, wenn die Entfernung zum Sitz eine oder mehrere der drei genannten Greifarten nicht mehr zulässt oder die Erreichbarkeit der Flächen durch andere Flächen versperrt wird. Aus diesem Grund werden die Flächen in Zonen mit guter, mittlerer und schlechter Erreichbarkeit aufgeteilt und die Bedienelemente darin nach Bedeutungsgehalt der Funktion angeordnet. Auf diese Weise legt bereits das frühe, sog. *Maßkonzept* den Grundstein für die Erreichbarkeit einiger Bedienelemente.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Position von Bedienelementen ist die Baukastenstrategie großer Automobilkonzerne. „Unter einem Baukasten versteht man im Fahrzeugbau Komponenten oder Baugruppen, die in verschiedenen Baureihen und [Fahrzeug-] Typen zur Verwendung kommen“ (Achleitner et al., 2016, S. 166). Das Ziel einer solchen Strategie ist es, „mit einem (gesamtheitlich gesehen) Minimum an Entwicklungs- und Investitionskosten ein Maximum an verschiedenen Typen und Varianten darzustellen. Zusätzlich verbessern sich Einkaufsbedingungen und Produktionskosten für die mit hoher Stückzahl produzierten Plattform- und Baukastenteile“ (Achleitner et al., 2016, S. 166).

Der Baukastenstrategie folgend wird ein Modul (bspw. Lichtdrehshalter) in mehreren Fahrzeugmodellen verbaut. Das Modul als solches hat zum einen das für die Fahrzeuginsassen sichtbare Bedienelement und zum anderen ein hinter der Verklei-

derung des Innenraums verborgenes Gehäuse. Die Unterbringung des Gehäuses erfordert einen gewissen Bauraum (sog. *Package*), der in verschiedenen Fahrzeugmodellen nicht immer an der gleichen Position gegeben ist. Dadurch kann die Notwendigkeit gegeben sein, dass die Position eines Bedienelementes neben ergonomischen auch durch bauraumbedingte Vorgaben bestimmt wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die durch Computersimulation von Menschmodellen, durch Fahrzeugdesign und durch die Erfahrung von Sachverständigen entstehende Anordnung der Bedienelemente im Innenraum eine entscheidende Rolle für Bedienkomfort der Fahrzeuginsassen spielt. Es ist deshalb besonders wichtig, frühzeitig Erreichbarkeitsprüfungen mittels virtueller Prototypen durchzuführen, um teure und zeitaufwendige Aufbauten von *Hardware-Mock-Ups* und somit Projektverzögerungen zu vermeiden.

Es existieren bisher nur wenige Arbeiten zu Untersuchungen von Erreichbarkeitsbewertungen in immersiven virtuellen Umgebungen. Zu nennen sind hier besonders Voss (2008) und Riedl (2012), deren inhaltliche Fragen und Versuchsausrüstung der vorliegenden Arbeit ähneln und deren Ergebnisse wichtige Anhaltspunkte für letztere liefern.

Ein wichtiger Aspekt für die zuverlässige Beurteilung von Erreichbarkeiten in virtuellen Prototypen ist die präzise Formulierung der Fragebogenitems. Voss (2008) fand in seiner Arbeit signifikante Unterschiede in Erreichbarkeitsbewertungen zwischen einem physischen Mock-Up und der virtuellen Darstellung. Er hielt dazu fest, dass „(. . .) die Versuchspersonen zwei unterschiedliche Fragestellungen bewertet haben“ (Voss, 2008, S. 51). Diesen Umstand begründete er damit, dass die gleiche Frageformulierung in der Realität eher zur Beurteilung der „Bedienbarkeit“ führte, während im Virtuellen tatsächlich „Erreichbarkeit“ beurteilt wurde. Er schrieb zusammenfassend: „Ohne die Versuchspersonen explizit auf diesen Unterschied hinzuweisen, kann offensichtlich nicht davon ausgegangen werden, dass eine Trennung der beiden Fragestellungen bei der Bewertung durch die Versuchspersonen erfolgt“ (Voss, 2008, S. 54). Voss macht weiterhin darauf aufmerksam, dass eine mangelnde haptische Abbildung des virtuellen Prototyps zu den Abweichungen der Ergebnisse beigetragen haben könnte.

Riedl (2012) untersuchte Erreichbarkeitsbeurteilungen in einem immersiven virtuellen Prototyp. Hierzu fügte er dem virtuellen und dem physischen Prototyp einige

ergonomische „Gestaltungsmängel“ zu und maß die Fehlerraten bei deren Entdeckung durch die Versuchspersonen. Seine Operationalisierung unterscheidet sich damit grundlegend zur Arbeit von Voss (2008) und zur vorliegenden Arbeit und erschwert eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Dennoch stellte er ähnlich zu Voss fest: „Für die Erreichbarkeit von Bedienelementen konnten signifikante Unterschiede in der Beurteilungsleistung festgestellt werden, wenn in der VR-Simulation der haptische Wahrnehmungskanal nur unzureichend angesprochen wird“ (Riedl, 2012, S. 124).

4.1.2 Beurteilung der Sicht nach außen

In einem Fahrzeug sitzend wird ein Teil des Umfeldes naturgemäß von der Karosserie verdeckt. Für das sichere Bewegen des Fahrzeugs im Straßenverkehr ist es für eine Fahrerin oder einen Fahrer gleichzeitig sehr wichtig, möglichst viel des Fahrzeugumfeldes zu überblicken.

Unter *Sicht nach außen* werden innerhalb dieser Arbeit vereinfacht die Anteile des Fahrzeugumfeldes bezeichnet, die für den Fahrer aus seiner Sitzposition heraus einsehbar sind, also nicht vom Fahrzeug verdeckt werden (Abbildung 24).

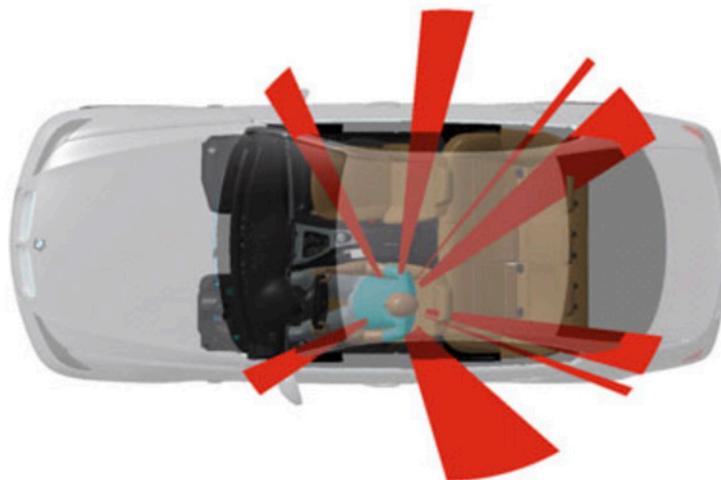


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Sichtverdeckung aus der Fahrerposition. Quelle: Braess & Seiffert (2012, S. 447).

In der Fahrzeugentwicklung wird die Sicht nach außen im Wesentlichen vom Gesamtfahrzeugkonzept beeinflusst (Braess & Seiffert, 2012, S. 447). Konkurrierende Anforderungen an die Crashesicherheit, die Aerodynamik, das Raumangebot und

das Design des Fahrzeugs verursachen in der frühen Entwicklungsphase einen Zielkonflikt. Für die verschiedenen Entwicklungsabteilungen besteht „(. . .) eine große Herausforderung darin, den erhöhten Sichtanforderungen, unter gleichzeitiger Verbesserung der scheinbar gegensätzlichen Randbedingungen, gerecht zu werden“ (Hudelmaier, 2003). Hudelmaier (2003, S. 11) nennt hierzu als Beispiel, dass große Spiegel zwar eine bessere Sicht nach hinten ermöglichen, jedoch gleichzeitig zur Sichtbeeinträchtigung der Frontsicht beitragen.

Aufgrund von wachsenden Anforderungen kommen neben Einrichtungen zur indirekten Sicht wie Spiegeln und Umfeldkameras auch vermehrt Assistenzsysteme (bspw. Park-Distanz-Kontrolle oder Spurwechselassistent) zum Einsatz, um den Fahrer dort zu unterstützen, wo Sichtverdeckungen zur Gefahr werden können.

Eine weitere Herausforderung ist die Subjektivität einer „guten“ Sicht nach außen. Zum einen hat die Anthropometrie (z.B. Körpergröße, -proportionen, -haltung) der späteren Fahrer und Fahrerinnen einen individuellen Einfluss, zum anderen kann auch die Erwartungshaltung an ein bestimmtes Fahrzeugsegment (bspw. erwarten Kunden eine bessere Übersichtlichkeit in SUVs, durch eine erhöhte Sitzposition) die subjektive Beurteilung der Sicht nach außen beeinflussen.

Hieraus ergibt sich der Bedarf, Sichtuntersuchungen möglichst früh im Produktentstehungsprozess anhand von virtuellen Prototypen aus Kundensicht durchzuführen. Zu diesem Zeitpunkt sind einerseits Änderungen am Fahrzeugkonzept mit vergleichsweise geringem technischen und finanziellen Aufwand möglich und andererseits kann eine Vielzahl möglicher Lösungsvarianten beurteilt werden, ohne diese als *Hardware-Mock-Ups* aufbauen zu müssen.

Die Beurteilung der Sicht nach außen kann in drei Kategorien unterteilt werden:

1. Rundumsicht (direkte Sicht): Wie stark wird die Rundumsicht des Fahrers durch die Säulen des Fahrzeugs eingeschränkt (Braess & Seiffert, 2012, S. 227). Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) bezieht bei Fahrzeugvergleichstests zusätzlich störende Kopfstützen in die Beurteilung mit ein (ADAC e.V., 2016).
2. Spiegelsicht (indirekte Sicht): Bei der Spiegelsicht wird geprüft, ob die in der Rundumsicht verdeckten Segmente des Umfeldes (z.B. „Toter Winkel“) über die Spiegel eingesehen werden können.

3. Vorderes und hinteres Nahfeld: Bei dieser Kategorie wird geprüft, ob einerseits Hindernisse unmittelbar vor und hinter dem Fahrzeug gut erkennbar sind und weiterhin ob vordere und hintere Fahrzeugabschlüsse gut erkennbar oder einzuschätzen sind (ADAC e.V., 2016).

Für die beschriebene Beurteilung der Sicht nach außen mittels immersiver virtueller Prototypen gibt es wenige aussagekräftige empirische Untersuchungen, die die Validität der Beurteilungsergebnisse hinterfragt und untersucht haben. Voss (2008) und Riedl (2012) führten beispielsweise Sichtbeurteilungen durch, attestierten deren Zuverlässigkeit jedoch nur für Sichtuntersuchungen innerhalb des Fahrzeuginnenraums (z.B. Sichtprüfung auf die Instrumententafel). Hier bedarf es mehr empirischer Studienergebnisse, um Aussagen für den operativen Einsatz immersiver virtueller Prototypen treffen zu können. „Der Begriff ‚operativer Einsatz‘ bedeutet, dass diese Verfahren als Entwicklungsinstrumente der spezifischen Eigenschaften genutzt werden, teilweise als Ersatz für Hardware-Methoden und teilweise in Ergänzung zu diesen“ (Braess et al., 2016, S. 1272).

4.1.3 Beurteilung des Raumgefühls im Fahrzeuginnenraum

Raumgefühl wird in der Literatur der Automobilergonomie häufig gleichbedeutend mit *Raumangebot* oder sogar *Raumbedarf* verwendet (siehe zum Beispiel Bubb et al., 2015, S. 356). Innerhalb dieser Arbeit wird folgende Abgrenzung der Begriffe vorgeschlagen:

Raumbedarf ergibt sich aus dem statischen und dynamischen Raumbedarf, den ein Insasse eines Fahrzeugs hat, um bspw. bei einer Kurvenfahrt den Fliehkräften entgegen zu arbeiten und seinen Körper verlagern zu können, ohne dabei zum Beispiel mit dem Kopf im Innenraum zu kollidieren. Der Raumbedarf wird häufig als Hüllkurve dargestellt (Bubb et al., 2015, S. 423).

Raumangebot ist ein objektives Maß für den Raum eines Fahrzeuges, der den Insassen eines Fahrzeuges zugänglich ist und nicht physisch durch Fahrzeugkomponenten eingenommen wird. Das Raumangebot wird einerseits durch die Karosserieform vorgegeben (Bubb et al., 2016) und variiert weiterhin abhängig von der Position eines Insassen im Fahrzeug (Bubb et al., 2015, S. 356).

Raumgefühl ist „(. . .) die emotionale Reaktion auf den subjektiven Eindruck durch Wahrnehmung und Empfinden eines Raums. Es wird durch das Form- und Farbzusammenspiel innerhalb des Raums positiv oder negativ beeinflusst“ (Peer-Oliver Wagner, 2013).

Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere das *Raumgefühl* von großem Interesse, da sich dieses zwar aus objektiven Maßen eines Fahrzeugkonzepts und der Fahrzeugausstattung zusammensetzt, jedoch interindividuell unterschiedlich empfunden wird (Bubb et al., 2016; Mandel, Müller & Maier, 2013).

Wagner (2013) zeigte, dass ein helles Interieur des gleichen Fahrzeugs gegenüber einem dunklen sprachlich ganz anders beschrieben wird und dass die Sitzposition intraindividuell in beiden messbar unterschiedlich eingestellt wird, obwohl es sich um die gleichen Raummaße handelte.

Es ist daher von großer Bedeutung für die Konzeptauslegung, ein Raumkonzept hinsichtlich der subjektiven Wirkung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess in verschiedenen Ausstattungsvarianten zu überprüfen. Hier bietet die immersive virtuelle Darstellung die Möglichkeit, mit einem relativ geringen Aufwand (an Datenaufbereitung) sehr viele Ausstattungsvarianten darstellen und beurteilen zu können. Dem entgegen steht die Möglichkeit, aufgrund der Eigenheiten von VR-Darstellungstechnik (siehe Diskussion in Abschnitt 2.2.3.7) zu falschen subjektiven Eindrücken und somit Bewertungsergebnissen zu kommen.

4.2 Forschungshypothesen

Sowohl vorliegende Vorstudienresultate (3.4.1) als auch bspw. die Untersuchungen von Voss (2008) und Riedl (2012) legen nahe, dass verschiedene Beurteilungsaspekte in der virtuellen Darstellung zu abweichenden Ergebnissen gegenüber physischen Prototypen führen können. Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, solche abweichenden VR-Beurteilungsergebnisse aufzudecken und inferenzstatistisch zu überprüfen. Die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Untersuchungsaspekte *Erreichbarkeiten von Bedienelementen*, der *Sicht nach außen* und des *Raumgefühls* gehören zu den grundlegenden Absicherungsaspekten.

Die Untersuchung, ob die virtuelle Innenraumdarstellung zu einer abweichenden Beurteilung gegenüber der eines *Hardware-Mock-Ups* sowie eines *Konzeptfahrzeugs* führt, wurde mithilfe der im Folgenden beschriebenen Forschungshypothesen durchgeführt. Die drei genannten Darstellungsarten des gleichen Fahrzeuginnenraums stellten verschiedene Stufen der *Display Fidelity* (Abschnitt 2.1.1) dar.

4.2.1 Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps führt zur abweichenden Beurteilung der Erreichbarkeit von Bedienelementen

Eine elementare Untersuchung von frühen Fahrzeugkonzepten ist die Beurteilung der *Erreichbarkeit von Bedienelementen* im Fahrzeuginnenraum. Sowohl in der Vorstudie (3.4.1) als auch bei Voss (2008) und Riedl (2012) wurde die Zuverlässigkeit der Erreichbarkeitsbeurteilung in VR in Frage gestellt (Abschnitt 3.4.1). Es wird daher zunächst von einer Abweichung der Beurteilungsergebnisse ausgegangen, die in der *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) erhoben werden. Zur Überprüfung eines möglichen Unterschieds unter praxisnahen Bedingungen wurde daher folgende Forschungshypothese aufgestellt und überprüft:

H1: Es gibt einen Unterschied zwischen der Beurteilung von *Erreichbarkeiten* in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen.

4.2.2 Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps führt zur abweichenden Beurteilung der Sicht nach außen

Weiterhin soll überprüft werden, ob die Beurteilung der *Sicht nach außen* in der virtuellen Fahrzeugdarstellung, die sich bspw. durch das eingeschränkte FOV des HMDs oder auch durch die virtuelle Darstellung einer Straßenumgebung von der Beurteilung in den physischen Prototypen in einer Hallenumgebung unterscheidet, zu abweichenden Ergebnissen führt. Hierzu wurde folgende Forschungshypothese postuliert:

H2: Es gibt einen Unterschied zwischen der Beurteilung der *Sicht nach außen* in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen.

4.2.3 Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps führt zur abweichenden Beurteilung des Raumgefühls

Auch ein gegenüber den physischen Prototypen abweichender subjektiver Eindruck des Raumgefühls war Gegenstand der Vorstudienenergebnisse. Nutzende, die während eines Beurteilungsvorganges sowohl in einem *Hardware-Mock-Up* als auch im virtuellen Prototyp beurteilten, berichteten, dass der „Raumeindruck“ bzw. das „Raumgefühl“ nicht mit dem aus dem *Hardware-Mock-Up* übereinstimmte (Abschnitt 3.4.4). Zur inferenzstatistischen Absicherung des qualitativen Befunds wurde folgende Hypothese postuliert und überprüft:

H3: Es gibt einen Unterschied zwischen der Beurteilung *des Raumgefühls* in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen.

4.2.4 Die Beurteilung eines virtuellen Prototyps verursacht Cybersickness

Die Auswertung der qualitativen Vorstudienenergebnisse (Abschnitt 3.4.3) deutete auf ein durch die Nutzung der *virtuellen Sitzkiste* hervorgerufenen Auftreten von unerwünschten Nebenwirkungen wie Schwindel, Übelkeit und Kopfschmerzen hin. Diese und weitere von den Interviewten berichteten Symptome entsprechen solchen, die im Zusammenhang mit VR-Simulatoren als *Cybersickness* bezeichnet werden (Abschnitt 2.1.4). Zur inferenzstatistischen Absicherung einer Zunahme der Symptome infolge einer virtuellen Absicherung wurde folgende gerichtete Veränderungshypothese überprüft:

H4: Es gibt einen Anstieg der berichteten Symptome auf der Cybersickness-Skala nach der Durchführung einer Innenraumbeurteilung in der virtuellen Sitzkiste.

4.3 Methode

Im Folgenden wird die methodische Herangehensweise, darunter das Untersuchungsdesign (4.3.1), die Versuchsapparatur und Operationalisierung der unabhängigen Variablen (4.3.2), die Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung der unabhängigen Variablen (4.3.3), die Rekrutierung der Versuchspersonen (4.3.4) und die endgültige Stichprobe (4.3.5) sowie die Untersuchungsdurchführung (4.3.6) und die Datenanalyse (4.3.7), im Detail dargestellt.

4.3.1 Design

Zur Untersuchung der Forschungshypothesen wurde eine quasi-experimentelle Laboruntersuchung (Hager, 1987, S. 71–73) im *Between-Subject-Design* nach einem unifaktoriellen Mehrstichprobenversuchsplan mit drei Versuchsgruppen $Q - 3$ durchgeführt (Sarris, 1992, S. 59–83).

Versuchsgruppe	Vorher-Messung	Treatment X	Nachher-Messung
		Display Fidelity des Fahrzeuginnenraums (UV)	
1	\bar{Y}_4 vor	X ₁ „Konzeptfahrzeug“	\bar{Y}_1 nach
			\bar{Y}_2 nach
			\bar{Y}_3 nach
			\bar{Y}_4 nach
2	\bar{Y}_4 vor	X ₂ „Hardware-Mock-Up“	\bar{Y}_1 nach
			\bar{Y}_2 nach
			\bar{Y}_3 nach
			\bar{Y}_4 nach
3	\bar{Y}_4 vor	X ₃ „Virtuelle Sitzkiste“	\bar{Y}_1 nach
			\bar{Y}_2 nach
			\bar{Y}_3 nach
			\bar{Y}_4 nach
AV ₁ : Erreichbarkeit von Bedienelementen (\bar{Y}_1) AV ₂ : Sicht nach außen (\bar{Y}_2) AV ₃ : Raumgefühl (\bar{Y}_3) AV ₄ : Cybersickness (\bar{Y}_4)			

Abbildung 25: Versuchsplan der quasi-experimentellen Laboruntersuchung zum Einfluss der Display Fidelity auf die Beurteilung eines Fahrzeuginnenraums.

Quelle: Eigene Darstellung.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Versuchsapparatur und Operationalisierung der unabhängigen Variable (4.3.2) *Display Fidelity des Fahrzeuginnenraums* (UV) sowie die Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung (4.3.3) der abhängigen Variablen *Erreichbarkeit von Bedienelementen* (AV1), *Sicht nach außen* (AV2), *Raumgefühl* (AV3) und *Cybersickness* (AV4).

4.3.2 Versuchsapparatur und Operationalisierung der unabhängigen Variablen

Im folgenden Abschnitt werden die genutzte Versuchsapparatur sowie das Stimulusmaterial und die Operationalisierung der unabhängigen Variablen beschrieben. Die unabhängige Variable *Display Fidelity des Fahrzeuginnenraums* (UV) wurde in drei Stufen variiert. Hierzu kamen drei unterschiedliche Darstellungsarten des gleichen Fahrzeuginnenraums zum Einsatz (Abbildung 26). Als physische Prototypen wurden ein *Konzeptfahrzeug* sowie ein *Hardware-Mock-Up* verwendet. Die immersive virtuelle Darstellung erfolgte in der *virtuellen Sitzkiste*.



Abbildung 26: Stimulusmaterial: Darstellung des gleichen Fahrzeuginnenraums mithilfe eines Konzeptfahrzeugs (a), eines Hardware-Mock-Ups (b) und in der virtuellen Sitzkiste (c). Quelle: Eigene Darstellung.

Konzeptfahrzeug

Als Referenz für einen möglichst vollständigen Fahrzeuginnenraum kam in der Untersuchung ein *Konzeptfahrzeug* zum Einsatz (Abbildung 26, linke Darstellung). Dabei handelte es sich um einen fahrbereiten Fahrzeugprototyp, der hinsichtlich der visuellen und haptischen Anmutung so aufgebaut war, dass er dem späteren Serienfahrzeug möglichst gut entsprach. In der Automobilindustrie ist ein *Konzeptfahrzeug* häufig das erste auf Basis von technischen Daten real hergestellte Fahrzeug im Produktentstehungsprozess (Braess & Seiffert, 2012, S. 889).

Hardware-Mock-Up

Als *Hardware-Mock-Up* kam im Versuch eine sog. *Ergonomie-Sitzkiste* zum Einsatz (Abbildung 26, mittlere Darstellung). Es handelte sich dabei um ein aus Polyurethan-Hartschaum gefrästes Fahrzeuginnenraummodell im Verhältnis 1:1 zum späteren Serienfahrzeug. Derartige Modelle dienen zur Beurteilung ergonomischer Fragestellungen in der frühen Konzeptphase.

Die raue Oberfläche des gefrästen Hartschaummodells wird versiegelt und in einem Uni-Farbtönen (z.B. grau oder schwarz) lackiert. Dadurch wird sie glatt. Fugen von späteren Innenraumelementen werden als Sicken (rinnenförmige Vertiefungen) ausgeführt. Displays und Anzeigen werden durch Aufkleber mit entsprechendem Inhalt dargestellt. Weiterhin werden einige Serienteile wie Sitze, Lenkrad oder Spiegel entsprechend der Konzeptmaße montiert.

Virtuelle Sitzkiste

Die immersive virtuelle Innenraumdarstellung (Abbildung 26, rechte Darstellung) erfolgte mithilfe der in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen *virtuellen Sitzkiste*. Hierzu wurde ein Datenmodell des Fahrzeugs genutzt, welches für die immersive virtuelle Darstellung vorbereitet wurde. Dabei wurden die geometrischen Flächen des Datenmodells mit fotorealistischen Materialien und Lacken belegt und die für die Bewertung erforderlichen kinematischen Öffnungs- und Schließbewegungen (bspw. Öffnung und Schließung der Fahrertür) animiert. Bei den im Versuch genutzten Daten handelte es sich um jene, die im Rahmen einer in der Praxis durchgeführten Fahrzeuginnenraumbewertung verwendet wurden.

Versuchsapparatur

Zum Versuchszeitpunkt befand sich die *virtuelle Sitzkiste* (2.2.4) in der folgenden Systemkonfiguration: Die Erzeugung der immersiven virtuellen Umgebung erfolgte mithilfe eines Render-Clusters auf Basis der Software RTT DeltaGen 12.1.1 (unter Verwendung der Module RTT Scale and RTT Immersive). Die Echtzeitberechnung erfolgte auf drei HP Z820 Workstations, ausgestattet mit je zwei Intel Xeon Prozessoren E5-2667 v2 @ 3,3 GHz; 196 GB RAM und zwei Nvidia Quadro K6000 Grafikkarten. Als Betriebssystem kam Windows 7 Enterprise SP1 (64Bit)

zum Einsatz. Die relative Position und Rotation des HMDs sowie zusätzlicher Interaktions-Devices wurden mithilfe eines optischen Trackingsystems (ART-TRACK2, 12 Kameras) erfasst und an das Render-Cluster weitergegeben.

4.3.3 Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung der abhängigen Variablen

Zur Beurteilung des Fahrzeuginnenraums und zur Bewertung der Innenraumdarstellung durch die Teilnehmenden sowie zur Messung von Presence und Cybersickness wurde ein mehrteiliger Fragebogen entworfen. Im Folgenden wird die Fragebogenkonstruktion (4.3.3.1) zwecks methodischer Transparenz detailliert beschrieben. Anschließend erfolgt eine Darstellung der operationalisierten Messgrößen (4.3.3.2).

4.3.3.1 Fragebogenkonstruktion

Im folgenden Abschnitt wird die Konstruktion der Fragebogenteile *Beurteilung des Fahrzeuginnenraums*, *Bewertung der Display Fidelity der Innenraumdarstellung*, *Cybersickness*, *Presence* und *Soziodemografie* im Detail erläutert.

Beurteilung des Fahrzeuginnenraums

Zur Bewertung des virtuellen Fahrzeuginnenraums durch die Teilnehmenden wurde ein Fragebogen mit 57 Items und einer Kontrollfrage entworfen. Der Fragebogen wurde hinsichtlich des Aufbaus und der zu erwartenden Bearbeitungsdauer (gesteuert über die Anzahl der Fragen) äquivalent zu einem Innenraumabsicherungsfragebogen aus der Praxis aufgebaut. Im Gegensatz zu diesem wurden jene Innenraum Aspekte in den Fokus gestellt, die sich auf die Erreichbarkeitsbeurteilung, Sicht nach außen und Raumgefühl bezogen.

Die Reihenfolge der Fragen wurde so gewählt, dass die bewertende Person sowohl auf der rechten als auch auf der linken Körperseite und sowie oberhalb als auch unterhalb der eigenen Brusthöhe bewertete. In der Praxis werden die Bewertungsaspekte hingegen überwiegend thematisch gruppiert und abgefragt. Auch die Entfernungen der zu bewertenden Elemente variierten zwischen nah (in Armreichweite) und fern (Oberkörper musste zum Objekt bewegt werden).

Bewertung der Display Fidelity der Innenraumdarstellung

In diesem Fragebogenabschnitt sollten die Teilnehmenden die in ihrer Versuchsgruppe verwendete Innenraumdarstellung mithilfe von 36 Items bewerten. Das Ziel hierbei war es, die unterschiedlichen Darstellungen des Fahrzeuginnenraums miteinander vergleichen zu können. Es wurde bspw. gefragt, wie stark die Versuchsteilnehmenden das Gefühl hatten, in einem normalen Fahrzeug zu sitzen, wie gut es ihnen möglich war, Erreichbarkeitsbeurteilungen durchzuführen, ob der Innenraum und die Umgebung des Fahrzeugs auf sie realistisch wirkte und wie sie die Lichtbedingungen und die Natürlichkeit der Interaktion empfanden.

Zusätzlich zu den Items mit Ratingskalen wurden fünf Freitext-Kommentarfelder eingebaut, in denen die Teilnehmenden Angaben zu besonders positiven oder negativen Aspekten der Beurteilung und auch Verbesserungsideen aufschreiben konnten.

Cybersickness – Simulator-Sickness-Questionnaire

Für die Erhebung von Cybersickness-Symptomen (siehe 2.1.4) kam eine eigene Übersetzung (Anhang B) des Simulator-Sickness-Questionnaire (SSQ) von Kennedy, Lane, Berbaum, & Lilienthal (1993) zum Einsatz. Der SSQ ist ein etabliertes Instrument für die Messung von Cybersickness-Symptomen (Mania & Chalmers, 2004, S. 251; So et al., 2001; Stanney & Salvendy, 1998).

Der Begriff *Cybersickness* (Abschnitt 2.1.4) bezieht sich im Gegenteil zu *Simulator-Sickness* auf Symptome, die durch die Darstellung von virtueller Realität hervorgerufen werden (Stanney et al., 1997).

Die verwendete Übersetzung ins Deutsche (Anhang B) entstand ursprünglich im Rahmen der Masterarbeit des Autors und wurde in der vorliegenden Arbeit wiederverwendet.

Der SSQ wurde den Teilnehmenden unter dem Titel „Befindlichkeitsabfrage“ vorgelegt, um negative Erwartungshaltungen durch den Begriff „Sickness“ oder „Simulatorkrankheit“ zu vermeiden.

Presence – Slater-Usoh-Steed-Questionnaire

Der von Slater, Usoh & Steed (1994) entwickelte Slater-Usoh-Steed-Questionnaire (SUS) erfasst das Presence-Empfinden durch subjektive Selbstauskunft in

Form eines standardisierten Fragebogens. Die fragebogenbasierte Presence-Messung gehört zu den am häufigsten eingesetzten Methoden (Nunez, 2007, S. 29–33; Youngblut, 2003, S. 5–9) und ist im Vergleich zu objektiven Messungen kostengünstig und einfach durchführbar. Sie greift durch die post-experimentelle Erhebung nicht in die eigentliche Presence-Erfahrung ein und hat eine hohe Augenscheinvalidität (Schuemie et al., 2001; Van Baren & IJsselsteijn, 2004, S. 4; Youngblut, 2003, S. 188). Mögliche generelle Nachteile von subjektiven Messmethoden sind unvollständige und durch individuelle Erfahrungen verfälschte Erinnerungen der befragten Personen (Bortz & Döring, 2009, S. 191).

Der SUS beinhaltet drei Presence-Indikatoren:

1. Subjektives Empfinden des Vor-Ort-Seins (engl.: sense of being there).
2. Das Maß, mit dem die virtuelle Umgebung „realer oder präsenter“ wirkte als die alltägliche Realität.
3. Das Maß, mit dem die virtuelle Umgebung im Gedächtnis „örtlich“ wirkte, als wäre sie ein besuchter Ort, und nicht als Bilder, die betrachtet wurden.

Der SUS umfasste ursprünglich drei (Slater & Usoh, 1993) und später sechs (Slater, Steed, McCarthy & Maringelli, 1998; Usoh, Catena, Arman & Slater, 2000) Items zur Operationalisierung der drei Indikatoren. Die Items werden auf einer siebenstufigen Ratingskala (Wertebereich: 1–7) erhoben. Eine höhere Ausprägung auf der Skala steht für ein höheres Presence-Empfinden.

Nach der von den Autoren vorgeschlagenen konservativen Auswertung (Slater et al., 1998) werden alle Antworten mit einem Wert größer sechs (hohes Presence-Empfinden) summiert und ergeben einen *SUS-Count-Index* (Wertebereich: 0–6). Hierdurch entsteht eine binomialverteilte Variable, bei der auf die Interpretation von ordinalskalierten Merkmalen als intervallskalierte verzichtet werden kann und die logistische Regression als statistisches Auswertungsverfahren verwendet wird. Während diese Auswertungsmethode hauptsächlich von der Arbeitsgruppe rund um die Autoren eingesetzt wurde, existieren auch zahlreiche Arbeiten, welche die (weniger konservative) Mittelwertbildung und den Mittelwertvergleich von Ratingskalen benutzten (Nunez, 2007, S. 30).

Die verwendete Übersetzung ins Deutsche entstand wie bereits beim SSQ ursprünglich im Rahmen der Masterarbeit des Autors. Für die Untersuchung von Fahrzeuginnenräumen wurden die Formulierungen der Items entsprechend zur Originalfassung modifiziert (Anhang A).

Soziodemografie

Im Schlussteil des Fragebogens wurden die gängigen soziodemografischen Merkmale wie Geschlecht, Alter, Körpergröße und Bildungsabschluss zur Stichprobendeskription erhoben. Als weitere für das Studienthema relevante Merkmale wurden zusätzlich die Vorerfahrungen mit 3D/VR, das Tragen von Sehhilfen sowie Einschränkungen der Farbwahrnehmung (z.B. Rot-Grün-Sehchwäche) abgefragt.

Diese Angaben wurden ausschließlich zur Stichprobenbeschreibung verwendet. Hierzu wurden sie wie alle anderen Daten anonymisiert und ohne Personenbezug verwendet. Somit wurde gewährleistet, dass kein Rückschluss auf einzelne Teilnehmerinnen und Teilnehmer möglich war.

4.3.3.2 Operationalisierung der abhängigen Variablen

Der folgende Abschnitt beschreibt die Bildung von Indizes zur Operationalisierung der abhängigen Variablen *Erreichbarkeit von Bedienelementen* (AV1), *Sicht nach außen* (AV2) und *Raumgefühl* (AV3).

Erreichbarkeit von Bedienelementen

Zur Untersuchung eines durch die virtuelle Darstellung bedingten Unterschieds bei der Beurteilung der *Erreichbarkeiten von Innenraumelementen* im Greifraum (Abschnitt 4.1.1) wurde ein ungewichteter Index *Erreichbarkeit von Bedienelementen* (AV1) aus 14 Items des ersten Fragebogenteils gebildet (Abschnitt 4.3.3). Die interne Konsistenz wurde mit Cronbachs $\alpha = .721$ bestimmt. Die Items wurden als arithmetisches Mittel miteinander verrechnet. Die ausgewählten Items (Anhang D.2) deckten dabei sowohl Erreichbarkeitsbeurteilungen links und rechts sowie oberhalb und unterhalb der Oberkörpermitte ab. Die Skalenwerte des Fragebogens 1–6 wurden für die statistische Auswertung umgepolt (siehe Abschnitt 4.3.7.2). Nach der Rekodierung entsprach eine niedrige Zustimmung dem Wert 0 und eine hohe Zustimmung dem Wert 5.

Gefragt wurde zum Beispiel:

Bitte greifen und berühren Sie folgende Elemente und beurteilen Sie deren Erreichbarkeit vom Fahrerplatz aus. Der Zuziehgriff der Fahrtür ist:

(1) sehr gut erreichbar – (6) sehr schlecht erreichbar

Sicht nach außen

Die Operationalisierung der *Sicht nach außen* erfolgte ebenfalls über einen ungewichteten Index *Sicht nach außen* (AV2). Bestehend aus 14 Items des ersten Fragebogenteils (Abschnitt 4.3.3), die zu einem arithmetischen Mittelwert verrechnet wurden, wies dieser eine interne Konsistenz von Cronbachs $\alpha = .764$ auf. Die Übersicht der verwendeten Items ist in Anhang D.3 dargestellt. Für die statistische Auswertung wurde die Skala umgepolt (4.3.7.2).

Erhoben wurden subjektive Bewertungen der Sicht aus dem Fahrzeuginnenraum nach außen und der Übersichtlichkeit der äußeren Fahrzeugabmessungen. Gefragt wurde beispielsweise:

Die Sicht nach vorne wird: vom Dachrahmen

(1) gar nicht eingeschränkt – (6) sehr stark eingeschränkt

Raumgefühl

Auch die Operationalisierung des Raumgefühls erfolgte mit einem ungewichteten Index *Raumgefühl* (AV3) bestehend aus 18 Items zur Beurteilung des subjektiven Raumgefühls (Fragen zur Bewegungsfreiheit, zum Raumeindruck, zu Lichtbedingungen etc.). Die interne Konsistenz wurde mit Cronbachs $\alpha = .819$ als ausreichend festgestellt. Auch bei diesem Index wurden die Item-Werte arithmetisch gemittelt und für die statistische Auswertung umgepolt (4.3.7.2). Eine vollständige Auflistung der Items kann Anhang D.4 entnommen werden. Eine beispielhafte Formulierung war:

Der Innenraum in der vorderen Sitzreihe wirkt auf mich

(1) geräumig – (6) eng

4.3.4 Rekrutierung

Die Rekrutierung von Versuchspersonen erfolgte über einen Probandenpool (Access-Panel). Dieser besteht aus Volkswagen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern verschiedener Einsatzbereiche am Standort Wolfsburg, die sich freiwillig für die Teilnahme an Versuchen registriert haben. Bei der Rekrutierung für einen Versuch werden die registrierten Personen in einer E-Mail eingeladen, an einem Versuch teilzunehmen. Die Einladung enthält generell eine kurze Beschreibung sowie Dauer und Zeitraum des Versuchs. Über ein Buchungssystem haben registrierte Personen bei Erhalt der Einladung die Möglichkeit, sich für die Teilnahme an einem Versuch anzumelden und in einen freien Versuchsslot einzutragen.

Der einzuladende Personenkreis wurde im Vorfeld der Untersuchung wie folgt definiert: Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sollten in den Bereichen Forschung oder Entwicklung tätig sein und sich im Altersbereich zwischen 30 und 50 Jahren befinden. Der Anteil von weiblichen Teilnehmerinnen in der endgültigen Stichprobe sollte mindestens 30% betragen. Dieses grobe Personenprofil entspricht in etwa den regelmäßigen Nutzern des Systems und den Teilnehmenden der Vorstudie (Abschnitt 3.3.5). Das in der Untersuchung verwendete System zur immersiven Darstellung ist auf die universelle Einsetzbarkeit ausgelegt und wird für die Absicherung einer Vielzahl heterogener Fahrzeugprojekte eingesetzt. Infolgedessen war es im Vorfeld nicht möglich, eine detailliertere Definition der Population aufzustellen oder einen gültigen Quotenplan abzuleiten. Brillenträger wurden nicht explizit ausgeschlossen, da das verwendete HMD in Kombination mit einer Brille verwendet werden kann.

Die Beschreibung des Versuchs in der Einladungs-E-Mail lautete: „Die Vergleichbarkeit virtueller und realer Fahrzeugbewertungen“. Die Beschreibung beschränkte sich lediglich auf allgemeine Informationen zum Zweck und Inhalt des Versuchs, um die Aufmerksamkeit der Teilnehmenden nicht auf einzelne Untersuchungsaspekte zu fokussieren. So wurde bspw. bewusst darauf verzichtet, das in der Untersuchung verwendete Fahrzeugmodell zu benennen, um eine Verzerrung der Stichprobe durch Teilnehmer mit Vorkenntnissen zum Fahrzeugprojekt zu vermeiden.

Als Aufwandsentschädigung (Incentive) für die Teilnahme an den Versuchen erhalten die Teilnehmenden des Probandenpools unabhängig vom Versuchsinhalt ein

Sachgeschenk. Dieses kann im Anschluss an einen Versuch von der Untersuchungsperson eigenständig aus einer Auswahl von drei bis fünf Gegenständen ausgesucht werden. Die Vorauswahl und Bereitstellung der Sachgeschenke erfolgt durch das Organisationsteam des Probandenpools unabhängig vom Versuchsinhalt, Versuchsleitung und Teilnehmern anhand der voraussichtlichen Versuchsdauer.

Unter den genannten Randbedingungen wurde eine *nicht-zufällige, selbstselektive* Stichprobe rekrutiert.

4.3.5 Stichprobe

Insgesamt nahmen 98 Personen an der Untersuchung teil. In zwei Fällen konnte der Versuch aufgrund von technischen Störungen nicht vollständig durchgeführt und gewertet werden. Die endgültige Stichprobe umfasste $N = 96$ Teilnehmerinnen und Teilnehmer (26% Frauen, 74% Männer) im Alter von 25 bis 51 Jahren ($Mdn = 41\text{--}45$ Jahre).

40 (42%) der Teilnehmerinnen und Teilnehmer gaben an, beim Autofahren eine Brille oder Kontaktlinsen zu tragen und 28 (29%) verwendeten im Alltag eine Lesbrille.

Keine Teilnehmerin oder Teilnehmer gab an, an einer eingeschränkten Farbwahrnehmung zu leiden. Hierzu wurden die Versuchspersonen gefragt: „Sind Ihnen Einschränkungen Ihrer Farbwahrnehmung bekannt (z. B. Rot-Grün-Sehschwäche)?“

Die Stichprobe enthielt Teilnehmerinnen und Teilnehmer mit Vorerfahrungen in den Bereichen: Virtual Reality $n = 28$ (29%); Virtuelle Sitzkisten $n = 29$ (30%); Virtuelle Fahrzeugabsicherung $n = 7$ (7%). Eine vollständige Auflistung der Merkmalshäufigkeiten kann Tabelle 3 entnommen werden.

Eine randomisierte Zuteilung der Untersuchungspersonen auf die drei Versuchsgruppen konnte aufgrund der zeitlichen Verfügbarkeit der Prototypen nicht sichergestellt werden. Die Versuchsgruppen wurden hinsichtlich des Geschlechts, der Körpergröße und des Alters parallelisiert.

Tabelle 3

Übersicht der Merkmalshäufigkeiten innerhalb der Stichprobe (N = 96)

Merkmal	n	%
Geschlecht		
Männlich	71	74
Weiblich	25	26
Alter zum Befragungszeitpunkt (in Jahren)		
< 26	2	2
26–30	8	8
31–35	19	20
36–40	18	19
41–45	19	20
46–50	30	31
Körpergröße (in Zentimetern)		
< 160	0	0
160–169	13	14
170–179	29	30
180–189	43	45
190–199	10	10
199 >	1	1
Höchster Bildungsabschluss		
Ohne Schulabschluss	0	0
Schulabschluss (z. B. Haupt-, Real-, Gymnasialabschluss)	1	1
Abgeschlossene Berufsausbildung (nach Lehre oder Berufsfachschule)	8	8
Techniker(-in), Meister(-in), Fachwirt(-in)	19	20
Hochschulabschluss	67	70
Nicht angegeben	1	1
Verwenden einer Sehhilfe		
Lesebrille	28	29
Brille (während der Autofahrt)	32	33
Gleitsichtbrille (während der Autofahrt)	6	6
Kontaktlinsen (während der Autofahrt)	6	6
Vorerfahrungen		
3D-Spiele, 3D-Filme	57	59
Virtual Reality	28	29
Augmented Reality	17	18
Computersimulation	53	55
CAD, DMU, Konstruktion	55	57
Sitzkisten	45	47
Virtuellen Sitzkisten	29	30
Beurteilung von Prototypen oder Konzeptfahrzeugen	43	45
Virtuelle Fahrzeugabsicherung	7	7
Vorerfahrungen mit dargestelltem Fahrzeugmodell (oder Vorgängermodell)		
Im privaten Bereich	20	21
Beruflich	31	32
Privat und beruflich	10	10

Anmerkung. Aufgrund von Rundungen können sich bei prozentualen Angaben geringfügige Abweichungen ergeben.

4.3.6 Untersuchungsdurchführung

Zur Sicherstellung der Transparenz und Replizierbarkeit der Arbeit im Sinne der Wissenschaftlichkeit (Döring & Bortz, 2016, S. 104 ff.) folgt eine detaillierte Schilderung der Untersuchungsabläufe. Ein Überblick des Versuchsablaufs kann Abbildung 27 entnommen werden.

Zur Steigerung der ökologischen Validität (Döring & Bortz, 2016, S. 106) wurden die Untersuchungsbedingungen so gewählt, dass sie denen im Praxisalltag möglichst nahe kommen. Hierzu wurden die gleichen Räume und die gleiche Apparatur verwendet, wie sie für Beurteilungen von Fahrzeugprojekten genutzt werden. Die Struktur und Dauer der Datenerhebung wurde äquivalent zur Praxisbeurteilung gewählt. In den beiden physischen Prototypen erhielten die Teilnehmenden ein Klemmbrett mit dem Fragebogen, welchen sie eigenständig bearbeiteten. In der virtuellen Fahrzeugdarstellung wurden die Fragen des Fahrzeugbeurteilungsbogens durch den Versuchsleiter vorgelesen und deren Beurteilungsergebnisse vom Versuchsleiter auf dem Bogen notiert, da die eigenständige Bearbeitung durch das Tragen des HMDs nicht möglich war. Auch das Ansteuern verschiedener 3D-Animationen (bspw. das Öffnen von Türen) wurde vom Versuchsleiter vorgenommen.

Abweichend zur Beurteilung in der Praxis befanden sich außer dem Versuchsleiter und der jeweiligen Versuchsperson keine weiteren Personen im Raum.

Die Durchführung der Untersuchung erfolgte in zwei Etappen über eine Gesamtdauer von circa vier Wochen in der technischen Entwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg. In der ersten Etappe (05. bis 13. Januar 2015) erfolgte die Datenerhebung anhand von zwei physischen Prototypen. In der zweiten Etappe (Versuchstage verteilt zwischen dem 19. Februar und dem 18. März 2015) erfolgte die Datenerhebung in der *virtuellen Sitzkiste*. Die mittlere Dauer der Innenraumbeurteilung sowie der Gesamtdauer der Untersuchung können Tabelle 4 entnommen werden.

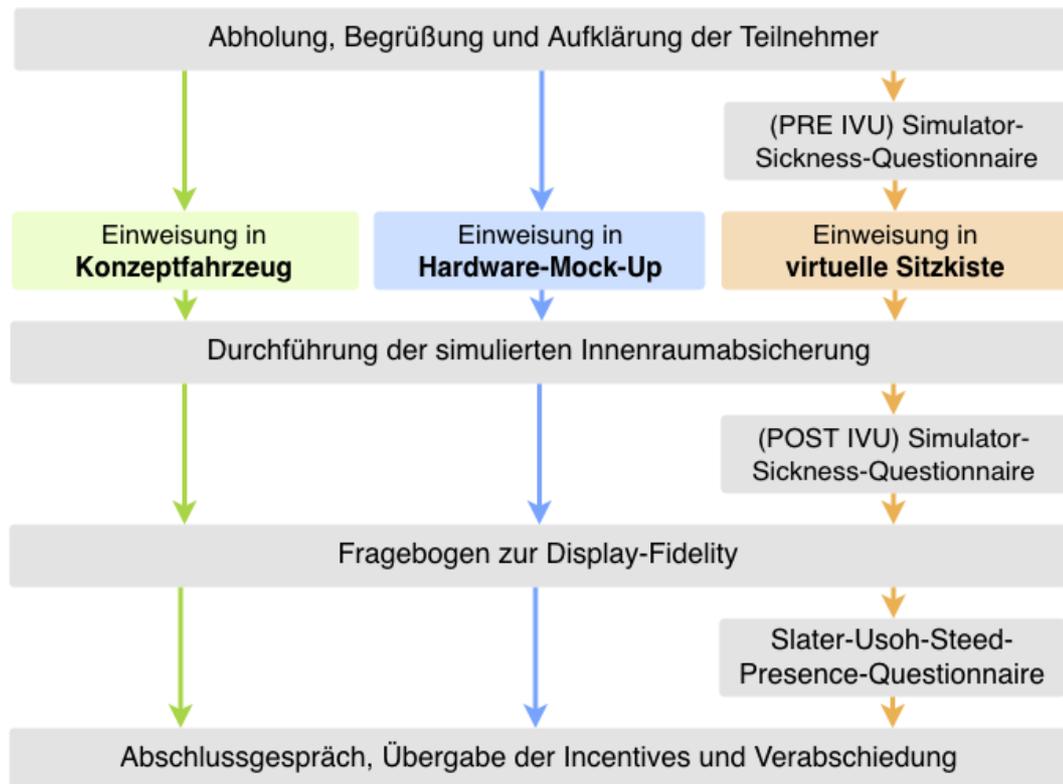


Abbildung 27: Schematischer Ablauf der Versuchsdurchführung für die Gruppen mit simulierter Innenraumabsicherung im Konzeptfahrzeug (grün), Hardware-Mock-Up (blau) und virtueller Sitzkiste (orange). Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4

Dauer der Innenraumbeurteilung sowie der Untersuchungsdurchführung pro Versuchsgruppe (N = 95)

	Versuchsgruppe					
	Konzept-fahrzeug <i>n</i> = 30		Hardware-Mock-Up <i>n</i> = 33		Virtuelle Sitzkiste <i>n</i> = 32	
	M	SD	M	SD	M	SD
Dauer (in Minuten)						
Innenraumbeurteilung	24:56	5:53	24:12	6:21	31:24	7:16
Untersuchungs-durchführung	38:25	8:06	38:00	8:50	49:26	10:47

4.3.6.1 Begrüßung und Aufklärung der Teilnehmenden

Die Versuchspersonen wurden an einem zentralen Treffpunkt vom Versuchsleiter abgeholt und in die nahegelegenen Versuchsräume gebracht. Dort wurden sie zunächst mündlich standardisiert über die Rahmenbedingungen (Inhalt, Ablauf und Dauer) der Untersuchung aufgeklärt. Hierzu las der Versuchsleiter standardisierte Instruktionen vor (Anhang D.1). Zur Sicherung der Forschungsethik (Döring & Bortz, 2016, S. 123 ff.) wurden die Teilnehmenden über ihre Rechte aufgeklärt und gaben im Anschluss mündlich eine informierte Einwilligung in die Untersuchungsteilnahme.

Sie wurden darüber informiert, dass sie als freiwillige Teilnehmer jederzeit und ohne persönliche Konsequenzen die Möglichkeit haben, die Untersuchung zu pausieren oder abubrechen sowie auch einzelne Fragen auszulassen. Ebenso wurde ihnen mitgeteilt, dass die Daten anonym erhoben und die Ergebnisse so zusammengefasst werden, dass anschließend kein Rückschluss auf den Einzelnen möglich sei. Im Anschluss bestand die Möglichkeit, Fragen zum Ablauf zu stellen.

Es wurde darauf geachtet, dass Mobiltelefone während der Durchführung aus- oder stummgeschaltet waren und nicht am Körper getragen wurden.

Den Versuchspersonen wurde im Vorfeld (in der Einladung sowie bei Nachfragen) mitgeteilt, dass der Versuch die „Vergleichbarkeit virtueller und realer Fahrzeugbewertungen“ zum Gegenstand hat.

Fragen dazu, ob es sich um einen Fahrversuch in VR handelt, wurden bei Bedarf vor dem Hintergrund von *Cybersickness* erörtert. Bei weiterführenden Fragen zum Hintergrund der Untersuchung wurden die Versuchspersonen gebeten, diese nach dem Versuchsdurchlauf zu stellen, um Verzerrungen in den Daten durch Beeinflussung, selektive Wahrnehmung etc. zu vermeiden.

4.3.6.2 Einweisung in die Innenraumdarstellung

Anschließend wurden die Versuchspersonen zum jeweiligen Prototypen gebracht und gebeten, sich auf den Fahrersitz zu setzen und sich Sitz und Lenkrad so einzustellen, wie sie es vor Fahrtantritt in einem Fahrzeug tun würden. Sie erhielten dann einen Überblick über die Reihenfolge und Struktur des Fragebogens. In der zuvor genannten ersten Etappe der Datenerhebung standen zwei physische Prototypen

gleichzeitig, jedoch räumlich getrennt, zur Verfügung. In dieser Etappe wurden jeweils zwei Versuchspersonen gemeinsam aufgeklärt, die Einweisung in die Innenraumdarstellung und alle weiteren Schritte erfolgten dann einzeln. Nach Beginn der Beurteilung bearbeiteten die Teilnehmenden den Fragenbogen eigenständig, während der Versuchsleiter abseits im Raum sitzend für Fragen zur Verfügung stand.

In der zweiten Erhebungsetappe erfolgte abweichend zur ersten die Durchführung mit jeweils einem Teilnehmer pro Versuchsslot und der Versuchsleiter unterstützte dabei, den Fragebogen auszufüllen. Letzteres war notwendig, da die Versuchspersonen während des gesamten Versuchs ein HMD trugen. Weiterhin bearbeiteten Teilnehmende dieser Versuchsgruppe zusätzlich vor und nach dem Versuch Fragebogenteile zur *Cybersickness* (Anhang B) und zur *Presense* (Anhang A). Ziel der zusätzlichen Erhebung war es, die durch die IVU verursachten Symptome von Cybersickness und zum Presense-Eindruck zu erfassen

Versuchsdauer, Zwischenzeiten, Anmerkungen der Versuchspersonen und besondere Vorkommen (Störungen etc.) wurden vom Versuchsleiter auf einem Protokollbogen vermerkt.

4.3.6.3 Simulierte Innenraumbeurteilung

Im ersten Abschnitt des Experiments bewerteten die Versuchspersonen den Fahrzeuginnenraum mithilfe der ihnen zur Verfügung gestellten Innenraumdarstellung anhand von 57 Items, davon 13 als Fondpassagier. Die Formulierung der Fragen und Beurteilungskriterien entsprachen weitestgehend denen in der Praxis verwendeten. Sie wurden jedoch im Hinblick auf die Trennschärfe teilweise auf mehrere Items aufgeteilt. Die Reihenfolge der Bewertungspunkte wurde so konstruiert, dass die Untersuchungspersonen sich einen umfassenden Überblick über den Fahrzeuginnenraum verschaffen konnten, indem sie Bewertungen auf jeder Körperseite sowie ober- und unterhalb des Horizonts durchführten. Zusätzlich zu der vorderen Sitzreihe auf der Fahrerseite wechselten sie während der Beurteilung auch in die hintere Sitzreihe auf die Beifahrerseite.

4.3.6.4 Beurteilung der Innenraumdarstellung

Die Versuchspersonen wurden nun gebeten zu bewerten, wie gut es ihnen möglich war, mithilfe der eingesetzten *Display Fidelity* der Innenraumdarstellung die Beurteilung des Innenraums vorzunehmen.

4.3.6.5 Abschlussgespräch und Übergabe der Incentives

Im Anschluss folgte eine formlose Nachbefragung der Versuchspersonen, bei der sie gebeten wurden, die gewonnenen Eindrücke nochmals kurz mündlich zu schildern, Kritik und Anregungen zu äußern sowie vorhandene Fragen zum Experiment und dem Projektumfeld zu stellen.

Im Abschlussgespräch gab es für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Gelegenheit, Fragen zur Untersuchung oder zum Fahrzeug zu stellen. Anschließend kontrollierte der Versuchsleiter die Vollständigkeit der Fragebögen und die Lesbarkeit der Freitextkommentare und stellte ggf. Rückfragen.

Im Rahmen der Verabschiedung führte der Versuchsleiter die Teilnehmer zu einem weiteren im Raum abseits positionierten Tisch mit einer Auswahl an Incentives. Diese wurden vom Probandenpool (siehe Abschnitt 4.3.4) als Aufwandsentschädigung zur Verfügung gestellt. Die Teilnehmer konnten aus drei bis fünf verschiedenen Incentives frei wählen. Der Versuchsleiter bedankte sich anschließend für die Teilnahme und verabschiedete sich von den Versuchspersonen.

4.3.7 Datenanalyse

Die Digitalisierung der erhobenen Daten in Form von Papierfragebögen erfolgte manuell in den Erhebungspausen und an den erhebungsfreien Tagen. Numerische Angaben auf den Papierfragebögen wurden zunächst in Microsoft Excel 2010 erfasst, da sie sich dort sehr flexibel kontrollieren und transformieren lassen. Die Tabellenstruktur in Excel wurde so aufgebaut, dass sie der Datenstruktur der Statistiksoftware SPSS entsprach. Fälle wurden über Zeilen und Variablen über Spalten abgebildet.

4.3.7.1 Eingabe und Bereinigung der Daten

Vor der eigentlichen Dateneingabe wurden alle Tabellenfelder in der Excel-Tabelle mit einem Kontrollwert „-99“ vorbelegt. Bei der Eingabe wurde der Kontrollwert durch den tatsächlichen Wert aus dem Fragebogen-Item überschrieben. Verbliebene Vorkommen der „-99“ identifizierten entweder Übertragungsfehler oder durch die Versuchsteilnehmer ausgelassene Items.

Die Übertragung der Item-Werte erfolgte seitenweise. Die Angaben einer Papierseite wurden zunächst vollständig übertragen und anschließend Item für Item kontrolliert. Wurden bei der Kontrolle Unstimmigkeiten festgestellt, erfolgte eine erneute Übertragung der gesamten Seite (vollständiger Abschnitt seit der letzten Eingabekontrolle).

Im Anschluss der Übertragung aller Fragebögen wurde der gesamte Excel-Datensatz systematisch auf nicht plausible Werte geprüft (siehe auch Lück, 2011). Daten, die sich durch Fehleingaben (bspw. „22“ statt „2“) außerhalb des plausiblen Bereiches (bspw. 1–6) der jeweiligen Variablen befanden und bei der Kontrolle während der manuellen Übertragung unentdeckt blieben sowie alle verbliebenen Vorkommen des Wertes „-99“, wurden sequenziell mit dem dazugehörigen Originalfragebogen abgeglichen und gegebenenfalls korrigiert.

4.3.7.2 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mithilfe des Softwarepakets *IBM SPSS Statistics 20*. Der Excel-Datensatz wurde mit der dafür vorgesehenen Funktion in SPSS importiert. Anschließend wurde der SPSS-Datensatz für die Auswertung vorbereitet, indem Skalenniveaus, Formate sowie fehlende Werte definiert und Beschriftungen der Variablen und Werteausprägungen vorgenommen wurden.

Der Wertebereich der sechsstufig skalierten Items (1–6) wurde umgepolt. Während im Fragebogen der kleinstmögliche Wert (1) der höchsten Zustimmung entsprach und der größte Wert (6) der geringsten, wurden die Werte so transformiert, dass eine hohe Zustimmung einem hohen Wert (5) entsprach und die geringste Zustimmung einer Null.

Textuelle Angaben, wie Kommentare und Anmerkungen, wurden mit Bezug zum jeweiligen Fragebogen und Item zur späteren Verwendung wörtlich abgetippt.

Gewichtete Indizes für den Slater-Usoh-Steed-Presence-Questionnaire und den Simulator-Sickness-Questionnaire wurden gemäß der Berechnungsvorschrift der jeweiligen Originalpublikation berechnet (siehe 4.3.3.1).

Die Anonymisierung der Daten wurde bereits im Vorfeld bei der Datenerhebung sichergestellt. Hierzu wurden fortlaufende Probandennummern statt Namen verwendet sowie darauf verzichtet, seltene soziodemografische Merkmale zu erheben oder in der Stichprobenbeschreibung zu verwenden.

4.4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der statistischen Signifikanztests zur Überprüfung des Einflusses der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung von *Erreichbarkeiten* (4.4.1), der *Sicht nach außen* (4.4.2) und des *Raumgefühls* (4.4.3) beschrieben. Weiterhin erfolgt die Darstellung der aufgetretenen *Cybersickness*-Symptome (4.4.4) und der im virtuellen Prototyp erlebten *Presence* (4.4.5).

4.4.1 Einfluss der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung von Erreichbarkeiten

Die Überprüfung der Hypothese, *es gäbe einen Unterschied zwischen der Beurteilung von Erreichbarkeiten in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen* (H1), wurde mithilfe eines Index *Erreichbarkeit von Bedienelementen* (AV1) überprüft (siehe Tabelle 5).

Hypothesenkonträr zeigte sich in der Stichprobe ($N = 95$) kein signifikanter Effekt der *Display Fidelity* auf die Erreichbarkeitsbeurteilung im virtuellen Fahrzeuginnenraum gegenüber dem *Konzeptfahrzeug*. Die Mittelwertdifferenz der Erreichbarkeitsbeurteilung (Wertebereich: 0–5) zwischen dem virtuellen Prototyp und dem *Konzeptfahrzeug* betrug 0.13.

Gleichzeitig zeigte die Varianzanalyse im Post-hoc-Mehrfachvergleich, dass sich die Beurteilungsergebnisse des *Hardware-Mock-Ups* sowohl vom virtuellen Fahrzeuginnenraum als auch vom *Konzeptfahrzeug* signifikant unterschieden ($F_{(2,92)} = 5.60, p = .005$). Dieser Unterschied (mit einer Mittelwertdifferenz von 0.26) ergab sich möglicherweise aufgrund von geringfügigen konstruktiven Unterschieden des *Hardware-Mock-Ups* und wird in Abschnitt 4.5.1 diskutiert.

Tabelle 5

Beurteilung der Erreichbarkeit von Bedienelementen nach Display Fidelity der Innenraumdarstellung (N = 95)

Index	Innenraumdarstellung					
	Konzept-fahrzeug <i>n</i> = 30		Hardware-Mock-Up <i>n</i> = 33		Virtuelle Sitzkiste <i>n</i> = 32	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Erreichbarkeit von Bedienelementen ^a	3.98 _a	0.45	3.72 _b	0.51	4.11 _a	0.48

Anmerkung. Mittelwerte derselben Zeile mit unterschiedlichen Kennbuchstaben (a, b, c) unterscheiden sich signifikant voneinander ($p < .05$).

^aWertebereich: 0–5.

4.4.2 Einfluss der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung der Sicht nach außen

Zur Überprüfung der Hypothese, *es gäbe einen Unterschied zwischen der Beurteilung der Sicht nach außen in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen (H2)*, wurde der Index *Sicht nach außen (AV2)* verwendet.

In der Stichprobe ($N = 95$) zeigten sich sehr geringe Differenzen der Mittelwerte (Tabelle 6). Inferenzstatistisch konnte kein signifikanter Effekt der *Display Fidelity* auf die Beurteilung der *Sicht nach außen* ($F_{(2,92)} = 0.28, p = .754, n.s.$) nachgewiesen werden.

Tabelle 6

Beurteilung der Sicht nach außen nach Display Fidelity der Innenraumdarstellung (N = 95)

Index	Innenraumdarstellung					
	Konzept-fahrzeug <i>n</i> = 30		Hardware-Mock-Up <i>n</i> = 33		Virtuelle Sitzkiste <i>n</i> = 32	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Sicht nach außen ^a	3.49	0.58	3.59	0.55	3.54	0.47

Anmerkung. ^aWertebereich: 0–5.

4.4.3 Einfluss der virtuellen Innenraumdarstellung auf die Beurteilung des Raumgefühls

Die Überprüfung der Hypothese, *es gäbe einen Unterschied zwischen der Beurteilung des Raumgefühls in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen (H3)*, wurde anhand des Index *Raumgefühl (AV3)* durchgeführt (Tabelle 7).

In der Stichprobe ($N = 96$) konnte ein signifikanter Effekt der *Display Fidelity* auf die Beurteilung des *Raumgefühls* ($F_{(2,93)} = 9.29, p < .001$) festgestellt werden. Der Post-hoc-Mehrfachvergleich ($p < .05$) zeigte, dass die Beurteilung des virtuellen Innenraums sich signifikant vom *Konzeptfahrzeug* unterschied. Es handelt sich dabei um einen großen Effekt ($\eta^2 = .166$). Zwischen den beiden physischen Prototypen wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt.

Tabelle 7

Beurteilung des Raumgefühls nach Display Fidelity der Innenraumdarstellung (N = 96)

Index	Innenraumdarstellung					
	Konzeptfahrzeug <i>n</i> = 31		Hardware-Mock-Up <i>n</i> = 33		Virtuelle Sitzkiste <i>n</i> = 32	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Raumgefühl ^a	4.04 _a	0.46	3.85 _a	0.47	3.55 _b	0.43

Anmerkung. Mittelwerte derselben Zeile mit unterschiedlichen Kennbuchstaben (a, b, c) unterscheiden sich signifikant voneinander ($p < .001$).

^aWertebereich: 0–5.

4.4.4 Nach virtueller Innenraumbeurteilung gemessene Cybersickness

Zur Überprüfung der Hypothese, es gäbe einen Anstieg der berichteten Symptome auf der Cybersickness-Skala nach der Durchführung einer Innenraumbeurteilung in der virtuellen Sitzkiste (H4), wurde eine Vorher-Nachher-Erhebung durchgeführt. Hierzu wurde der etablierte *Simulator-Sickness-Questionnaire* (SSQ) als Bestandteil in den Gesamtfragebogen aufgenommen (Abschnitt 4.3.3.1) und der Versuchsgruppe mit dem virtuellen Fahrzeugprototyp vorgelegt. In der Stichprobe ($N = 32$) zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Symptomausprägungen auf dem SSQ-Score (Tabelle 8). Ein t -Test für verbundene Stichproben (fallweiser Ausschluss) bestätigte, dass die Symptomausprägung der vor dem virtuellen Beurteilungsvorgang erhobenen Symptome ($M = 6.88$, $SD = 7.42$) sich signifikant von der Symptomausprägung nach der Beurteilung ($M = 26.18$, $SD = 24.82$) unterschied: $t_{(30)} = -4.77$, $p < .001$, $d = 1.07$. Es handelt sich dabei um einen großen Effekt nach Cohen (1977).

Die größte Zunahme der Symptome zeigte sich mit einer Differenz von 23.97 Punkten zur Vorher-Messung auf der Subskala *Disorientation* (bspw. Schwindel und Gleichgewichtsstörungen). Die zweitgrößte Zunahme verzeichnete die *Nausea*-Skala (Symptome der Übelkeit) mit einem Anstieg von 15.80 Punkten. Die Zunahme auf der *Oculomotor*-Skala (Symptome in Verbindung mit dem Augenbewegungsnerve) zeigte einen zur *Nausea*-Skala dem Betrag nach vergleichbaren Anstieg um 14.21 Punkte. Die Differenz des SSQ-Score betrug 19.52 Punkte.

Tabelle 8

Im Versuch aufgetretene Cybersickness-Symptome ($N = 32$)

Skala	Erhebungszeitpunkt	
	vor VR-Beurteilung	nach VR-Beurteilung
	Score ^a	Score ^a
SSQ-Score	6.66	26.18
Nausea	3.58	19.38
Oculomotor	7.82	22.03
Disorientation	5.22	29.19

Anmerkung. Die Berechnungsvorschrift und Gewichtung der Skalen kann Kennedy et al. (1993) entnommen werden.

^aDie Angabe der Scores erfolgt nach einem listenweisen Fallausschluss pro Erhebungszeitpunkt.

4.4.5 Nebenbefund: Durch virtuelle Innenraumbeurteilung erzeugte Presence

Als Basiswert zur Einordnung in zukünftigen Studien oder Weiterentwicklungsmaßnahmen der *virtuellen Sitzkiste* wurde im Anschluss an den Versuch die in der *virtuellen Sitzkiste* erlebte *Presence* ($N = 32$) mithilfe des SUS (siehe Abschnitt 4.3.3.1, *Slater-Usoh-Steed-Questionnaire*) gemessen. Die von Slater, Usoh & Steed (1994) vorgeschlagene Berechnungsvorschrift ergab einen *SUS-Count* von: $M = 2.16$, $SD = 1.92$. Die interne Konsistenz der Items wurde mit Cronbachs $\alpha = .636$ bestimmt.

Einige Publikationen weisen statt des von den Slater et al. (1994) vorgeschlagenen Index *SUS-Count* zur Vereinfachung einen Mittelwert über alle SUS-Items aus (Nunez, 2007, S. 30). Im Sinne der Vergleichbarkeit mit solchen Publikationen wurde ein solcher als *SUS-Mean* mit: $M = 4.85$, $SD = 0.80$ ermittelt.

4.5 Diskussion

Die in Kapitel 4.4 präsentierten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten 4.5.1 bis 4.5.3 interpretiert sowie die methodischen Einschränkungen der Studie diskutiert (4.5.5). Im Schlussteil der Diskussion werden die Ergebnisse in einem Fazit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben (4.5.6).

4.5.1 Beurteilung von Erreichbarkeiten in der virtuellen Sitzkiste

Das Ergebnis der Hypothesenprüfung (H1) zeigte keinen signifikanten Unterschied der Beurteilung in der *virtuellen Sitzkiste* gegenüber der Beurteilung im *Konzeptfahrzeug* (4.3.2). Der Mittelwertunterschied zwischen den Indizes beider Gruppen belief sich auf 0.13 Skalenpunkte. Dies ist insofern auffällig, als dass die Beurteilung in der *virtuellen Sitzkiste* sich wesentlich von der in einem realen Innenraum unterscheidet, da sie ohne Körperdarstellung und mit dem *Pointer* (siehe Abschnitt 2.2.4) als Hilfswerkzeug auskommt. Weiterhin konnten die Beurteilenden nur visuell feststellen, wann ein Innenraumelement erreicht war.

Die *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) bot demnach in ihrer Ausbaustufe zum Versuchszeitpunkt eine ausreichende *Display Fidelity*, um Erreichbarkeitsprüfungen rein virtuell vorzunehmen. Der Aufbau eines physischen Prototyps ist für diese Art der Beurteilung daher nicht notwendig, sofern eine präzise Formulierung der Items gewährleistet wird. Somit zeigt die Untersuchung ein gegenteiliges Ergebnis zu Voss (2008) und Riedl (2012), deren Ergebnisse in Abschnitt 4.1.1 diskutiert wurden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der signifikante Unterschied mittlerer Effektstärke ($\eta^2 = .109$) zwischen der Erreichbarkeitsbeurteilung des *Hardware-Mock-Ups* zum *Konzeptfahrzeug* und zur *virtuellen Sitzkiste*. Der Unterschied erschien zunächst nicht plausibel, da er den *Hardware-Mock-Up* sowohl von der virtuellen als auch von der physischen Darstellung abgrenzte, dies im Sinne der Hypothese jedoch nicht zu erwarten gewesen wäre. Eine Detailbetrachtung der Item-Messwerte zeigte jedoch, dass es sich dabei um einen plausiblen, tatsächlich vorhandenen, konstruktiven Unterschied im Fahrzeuginnenraum handelte. So unterschied sich die physische Position der Fensterheberschalter und der Mantelhaken in der hinteren Sitzreihe des *Hardware-Mock-Ups*, da diese im Laufe des Projektes geändert wurden.

Im virtuellen Prototyp und im *Konzeptfahrzeug* waren die Positionen hingegen identisch.

4.5.2 Beurteilung der Sicht nach außen in der virtuellen Sitzkiste

Die Überprüfung der Hypothese, dass es bei der Beurteilung der Sicht nach außen anhand der *virtuellen Sitzkiste* zu unterschiedlichen Beurteilungsergebnissen gegenüber dem Konzeptfahrzeug kommt (H2), zeigte keinen signifikanten Unterschied.

Die Unterschiede der Gruppenmittelwerte (4.4.2) bewegten sich in der Stichprobe im Bereich von 0.05 bis 0.1 Skalenpunkten (Wertebereich: 0–5) und haben keine praktisch relevante Bedeutung für die Interpretation solcher Beurteilungsergebnisse für den Einsatz der virtuellen Innenraumdarstellung. Auch der Vergleich der *virtuellen Sitzkiste* mit dem *Hardware-Mock-Up* führte zum gleichen Ergebnis. Beides spricht dafür, dass die *virtuelle Sitzkiste* in ihrer Ausprägung der *Display Fidelity* entgegen den geäußerten Befürchtungen der Benutzenden (siehe Abschnitt 3.4.1) ausreicht, um die Sicht nach außen eines Fahrzeugprototyps rein virtuell zu beurteilen, ohne dabei zu praktisch relevanten Abweichungen der Beurteilungsergebnisse zu gelangen.

4.5.3 Beurteilung des Raumgefühls in der virtuellen Sitzkiste

Die Hypothesenprüfung (4.4.3) ergab einen signifikanten Unterschied der Beurteilung des *Raumgefühls* in der virtuellen Innenraumdarstellung gegenüber den physischen Prototypen (H3).

Hierbei wurde das Raumgefühl (Wertebereich: 0–5) in der *virtuellen Sitzkiste* mit einer Differenz von 0.3 Skalenpunkten zum *Hardware-Mock-Up* und 0.49 zum *Konzeptfahrzeug* deutlich schlechter bewertet als in den beiden physischen Prototypen. Als wesentliche Einflussparameter sind hier die Eigenschaften des HMDs (Einschränkung des Gesichtsfelds durch zu kleines Field-of-View) als auch eine fehlende Körperrepräsentation (Avatar-Darstellung) zu vermuten.

Voss (2008) erhob in seiner Arbeit zwar „subjektives Raumgefühl“, ging in der Diskussion jedoch nicht weiter darauf ein. Seiner Ergebnisdarstellung kann entnommen werden, dass er keinen signifikanten Unterschied zwischen der virtuellen und der physischen Prototypdarstellung feststellen konnte. Die Beurteilung der

„Kopffreiheit“ hingegen zeigte in seiner Untersuchung einen signifikanten Unterschied zwischen der Beurteilung im virtuellen und physischen Fahrzeuginnenraum. Diesen Unterschied führte er auf das HMD zurück, welches durch die technischen Eigenschaften das vertikale Gesichtsfeld auf 33.5° gegenüber dem natürlichen Gesichtsfeld von 55° einschränkte.

Er hielt hierzu fest: „Dadurch kann die Versuchsperson in virtueller Umgebung nicht den Fahrzeughimmel vor der Stirn sehen, sondern nur die Sonnenblende. Da der Himmel aber vor der Stirn noch einmal ansteigt, wird die Kopffreiheit in realer Umgebung tendenziell besser bewertet“ (Voss, 2008, S. 50).

Es bleibt festzuhalten, dass die Beurteilung des Raumgefühls eines neuen Fahrzeugs nicht ausschließlich aufgrund einer Bewertung in der bestehenden Konfiguration der *virtuellen Sitzkiste* geschehen sollte. Da jedoch zwischen dem *Hardware-Mock-Up* und dem *Konzeptfahrzeug* kein Unterschied nachgewiesen werden konnte, kann zur Bewertung des Raumgefühls auf ein *Konzeptfahrzeug* verzichtet und auf den wesentlich günstigeren *Hardware-Mock-Up* zurückgegriffen werden.

4.5.4 Durch virtuelle Innenraumbewertung verursachte Cybersickness

Die inferenzstatistische Auswertung der erhobenen Daten zeigte hypothesenkonform, dass die in der *virtuellen Sitzkiste* unter praxisnahen Bedingungen durchgeführte simulierte Absicherung von Innenraumeigenschaften starke Cybersickness-Symptome auslöste. Im durchgeführten Versuch (Abschnitt 4.3.6) beurteilten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer den virtuellen Fahrzeugprototyp im Durchschnitt circa eine halbe Stunde ($M = 31:24$ min, $SD = 7:16$). Die Betrachtung der in Abschnitt 4.4.4 beschriebenen Differenzen der Vorher-Nachher-Messungen auf den einzelnen Subskalen stimmte mit dem von Stanney et al. (1997) aufgezeigten Symptomprofil von Cybersickness überein. Von einem solchen Profil ausgehend können infolge der Simulatorbenutzung Schwindel, Schwindelgefühl, allgemeine Beschwerden, erhöhter Speichelfluss, Schwitzen und Übelkeit auftreten. Die Autoren schlugen vor, Werte auf der SSQ-Score-Skala, die größer sind als 15, so zu bewerten, dass Personen aufgrund der empfundenen Unannehmlichkeiten keine erneute Nutzung des Simulators anstreben würden (1997, S. 1139).

Der in der vorliegenden Studie ermittelte SSQ-Score lag mit einem Wert von 26.18 eindeutig in diesem Bereich. Um langfristig das Ziel zu erreichen, möglichst viele physische Fahrzeugprototypen durch virtuelle zu ersetzen, bedeutet dies, dass die *Display Fidelity* der *virtuellen Sitzkiste* soweit optimiert werden sollte, dass die gemessenen Symptome einen möglichst geringen Wert (unter 15) annehmen. Andernfalls ist davon auszugehen, dass die Akzeptanz gegenüber der *virtuellen Absicherung* langfristig nur gering sein wird.

4.5.5 Methodische Einschränkungen

Die Durchführung der Studie unterlag methodischen Einschränkungen, die im Folgenden diskutiert werden.

Zu Beginn sei das quasi-experimentelle Untersuchungsdesign genannt. Dieses ergab sich aus der notwendigen Verteilung der Datenerhebungsphasen in Abhängigkeit der Verfügbarkeit des *Konzeptfahrzeugs*, des *Hardware-Mock-Ups* und der *virtuellen Sitzkiste*. Im Rahmen der praktischen Möglichkeiten konnte eine randomisierte Zuteilung der Versuchspersonen auf die unterschiedlichen Innenraumdarstellungsvarianten, wie sie für ein experimentelles Design erforderlich ist, nicht herbeigeführt werden. Die Studie wurde daher im quasi-experimentellen Untersuchungsdesign angelegt und die Versuchsgruppen hinsichtlich des Geschlechts, der Körpergröße und des Alters parallelisiert. Eine Konfundierung durch „unvollständige“ Parallelisierung kann streng genommen nicht ausgeschlossen werden. So konnten bspw. Vorerfahrungen mit virtuellen Prototypen oder Fahrzeuginnenraumbeurteilungen bei der Parallelisierung nicht berücksichtigt werden. Aufgrund strenger Auflagen in Bezug auf den Prototypenschutz und hieraus bedingter Nutzung eines internen Access-Panels wurde eine selbstselektive Gelegenheitsstichprobe gezogen.

Für die Beurteilung des virtuell dargestellten Innenraums mussten den Versuchsteilnehmerinnen und -teilnehmern dieser Studie die Beurteilungskriterien vom Versuchsleiter vorgelesen und durch diesen notiert werden, während die Fragebögen in den Gruppen der physischen Prototypen von den Teilnehmenden eigenständig bearbeitet wurden. Dies entspricht zwar der gängigen Praxis in der VR-Beurteilung unter Zuhilfenahme eines HMDs, ein möglicher Einfluss durch einen Versuchsleiter kann dennoch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

4.5.6 Fazit und Ausblick

Hinsichtlich der Beurteilungseignung schnitt der virtuelle Prototyp gegenüber den physischen unerwartet gut ab. Bei der Beurteilung der *Erreichbarkeiten von Bedienelementen* (H1) und der *Sicht nach außen* (H2) des gleichen Fahrzeuginnenraums lieferte der virtuelle Prototyp in der untersuchten Stichprobe vergleichbare Beurteilungsergebnisse, wie sie in den Gruppen mit den physischen Fahrzeugen entstanden sind. Bei der Beurteilung des *Raumgefühls* (H3) in der virtuellen Innenraumdarstellung hingegen konnte eine hypothesenkonforme signifikante Differenz der Beurteilungsergebnisse aufgezeigt werden. Diese Beurteilung kann demnach nicht rein virtuell mit dem verwendeten System vorgenommen werden. Die Überprüfung ansteigender *Cybersickness*-Symptome infolge der Nutzung der virtuellen Sitzkiste (H4) konnte hypothesenkonform mittels eines Prä-Post-Tests belegt werden. Eine Übersicht der durchgeführten Hypothesentests kann Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9

Übersicht der durchgeführten Hypothesentests

Hypothese	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	bestätigt
H1 Es gibt einen Unterschied zwischen der Beurteilung von <i>Erreichbarkeiten</i> in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen.	2,92	5.60	.005	.109	Nein ^a
H2 Es gibt einen Unterschied zwischen der Beurteilung der <i>Sicht nach außen</i> in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen.	2,92	0.28	.754	.006	Nein
H3 Es gibt einen Unterschied zwischen der Beurteilung des <i>Raumgefühls</i> in der immersiven virtuellen Innenraumdarstellung und der in physischen Fahrzeuginnenraumprototypen.	2,93	9.29	< .001 ^b	.166	Ja

Hypothese	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>Cohens d</i>	bestätigt
H4 Es gibt einen Anstieg der berichteten Symptome auf der <i>Cybersickness</i> -Skala nach der Durchführung einer Innenraumbeurteilung in der virtuellen Sitzkiste.	30	-4.77	< .001	1.07	Ja

Anmerkung. Die Angabe tatsächlicher p-Werte kleiner .001 erfolgt gemäß APA-Style (6th) als <.001.

^aHypothesenkonträr wurde kein Unterschied zwischen der virtuellen Darstellung und den physischen Prototypen festgestellt. Es zeigte sich jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden physischen Prototypen (siehe Diskussion in Abschnitt 4.5.1).

Die Durchführung der Untersuchung unter praxisnahen Bedingungen (gleicher Versuchsstandort, gleiche Versuchsapparatur sowie vergleichbarer Fragebogaufbau und Beurteilungsdauer) steigert die Aussagekraft der Ergebnisse in Bezug auf das untersuchte VR-System *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) und erhöht die ökologische Validität der Studienergebnisse.

Während die interne Validität durch das quasi-experimentelle Design und die Durchführung im Labor gesichert wurde, senkten sowohl die individuelle Konfiguration der VR-Versuchsapparatur als auch die Datenerhebungsmethode die externe Validität der Untersuchungsergebnisse. Deutlich wird dies, wenn die Ergebnisse in Bezug zu anderen Studien gesetzt werden sollen. So zeigte die vorliegende Arbeit Ergebnisse, die denen von (Voss, 2008) und (2012) widersprechen (siehe Ergebnisdiskussion 4.5). Beide untersuchten vergleichbare Fragestellungen (Sicht-, Erreichbarkeitsprüfungen und die Beurteilung von Raumgefühl) anhand von immersiven virtuellen Fahrzeugprototypen. Beide Arbeiten gehören jedoch zu den wenigen, deren Untersuchungskontext und Versuchsaufbau überhaupt mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar ist.

Ogleich die Wichtigkeit der immersiven *virtuellen Absicherung* (Abschnitt 3.1.3) in zahlreichen Publikationen der Automobilindustrie immer wieder dargestellt und gefordert wird, ist die Anzahl der hierzu durchgeführten empirischen Studien nach wie vor gering. Zudem fokussiert sich ein großer Teil der Arbeiten auf die Untersuchung dedizierter Teilaspekte (bspw. Entfernungswahrnehmung in VR) in einer spezifischen Darstellungsvariante (bspw. Entfernungswahrnehmung in einem projektionsbasierten System wie der CAVE). Es kann weiterhin vermutet werden, dass ein weiterer Teil existierender Untersuchungen aus Überlegungen der Wettbewerbsvorteile überhaupt nicht publiziert wird und der wissenschaftlichen Forschungsgemeinde nicht zur Verfügung steht.

Die vorliegenden Ergebnisse tragen zum wissenschaftlichen Verständnis der Beurteilung von immersiven virtuellen Fahrzeugprototypen bei und ergänzen hierbei das derzeit noch kleine Feld der publizierten Ergebnisse.

Bei der durchgeführten Literaturrecherche wurde festgestellt, dass keine etablierte Definition von *Raumgefühl* existiert sowie eine validierte Testbatterie für immersive virtuelle Umgebungen nicht vorhanden ist. Die im Rahmen dieser Arbeit zur

Erhebung genutzte Operationalisierung orientierte sich an Fragestellungen der Automobilergonomie. Folgende Forschungsarbeiten im Bereich von immersiven virtuellen Umgebungen könnten ansetzen, um eine Messskala aufzubauen und zu validieren. Im Idealfall würde diese den Vergleich virtueller und realer Räume erlauben (Braess & Seiffert, 2012, S. 889).

5 Quasi-experimentelle Laboruntersuchung: Steigerung der Display Fidelity von virtuellen Prototypen durch vibrotaktilen Feedback

Ogleich physische Prototypen sehr teuer und zeitaufwendig herzustellen sind, ist deren Aufbau nach wie vor stark verbreitet. Der Grund dafür ist deren räumliche Präsenz, die es dem Betrachter erlaubt, sie durch Ertasten zu erkunden und mittels der Hände auf eine intuitive Weise zu bedienen (Dai et al., 1996). Diese Möglichkeiten sind bei immersiven virtuellen Prototypen oftmals nicht gegeben, da viele VR-Systeme vor allem auf die visuelle und akustische Darstellung, jedoch nicht auf die haptische ausgelegt sind (Burdea, 1999; Slater, 2009). Nahezu jeder große Automobilkonzern und Luftfahrtunternehmen beschäftigen sich mit der Weiterentwicklung sowie der Integration von VR-Technologie in den Entwicklungsprozess (Gomes de Sá & Zachmann, 1999). Auf dem Weg, physische Prototypen durch digitale zu ersetzen, ist es entscheidend, dass letztere zumindest über den gleichen oder einen erweiterten Funktionsumfang verfügen, und zwar unabhängig von der eingesetzten Technologie (Wang, 2002). Ein ideales immersives VR-System für eine plausible, virtuelle Ersatzerfahrung bestünde aus verschiedenartigen Displays und böte die Möglichkeit, visuelle, akustische und haptische Sinneskanäle zu stimulieren (Slater, 2009). Es wird davon ausgegangen, dass multisensorisches Feedback sowohl das Presence-Gefühl als auch die Task-Performance in *immersiven virtuellen Umgebungen* (IVU, siehe Abschnitt 2.1) begünstigt (Kammermeier, Buss & Schmidt, 2001; Sallnäs, Rasmus-Gröhn & Sjöström, 2000).

Die geringe *Display Fidelity* (Abschnitt 2.1.1) im *haptischen* Bereich ist einer der Hauptgründe, aus dem Fahrzeugexperten die Bewertung von Fahrzeuginnenräumen anhand von immersiven virtuellen Prototypen meiden und nach wie vor physische Aufbauten bevorzugen (siehe Abschnitt 3.4).

Bubb et al. hielten hierzu fest:

Gerade der Mangel an haptischen Reizen ist für die Beurteilung von Fahrzeuginnenräumen sehr hinderlich. Man behilft sich teilweise mit einer optischen Substitution, in dem man das Berühren von Oberflächen optisch markiert, z. B. durch rote Einfärbung der Fläche. Allerdings ist diese Maßnahme nur als eine weitgehend unzureichende Substitution des korrekten haptischen Reizes anzusehen (. . .) Es gibt auch Versuche, die Versuchsperson mit speziellen Handschuhen auszustatten und das Berühren von Oberflächen durch einen elektrischen Reiz zu signalisieren (Bubb et al., 2015, S. 592).

Die Simulation *haptischer* Reize in VR-Systemen ist, wie im Abschnitt über theoretische Grundlagen dargelegt (5.1.1), sowohl technisch anspruchsvoller als auch in der Datenvorbereitung aufwendiger als die der visuellen. Weiterhin schließen bauartbedingte Faktoren wie Gewicht, Größe oder akustische Geräuschentwicklung die Verwendung mancher haptischer Feedback-Devices (trotz guter Darstellungsleistung) aus, wenn diese mit der Einsatzumgebung nicht kompatibel sind (Hayward & Astley, 1996).

In der vorliegenden Studie wurde die Möglichkeit untersucht, die haptische Erlebarkeit eines immersiven virtuellen Fahrzeuginnenraums durch Steigerung der *Display Fidelity* mit vibrotaktilen Feedback zu erhöhen und unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen. Hierzu wurde eine technische Lösung entwickelt, die es erlaubt, zwei leichte, kabellose, vibrotaktile Armbänder in ein bestehendes VR-System zu integrieren und dort für die Bewertung (Absicherung) der Erreichbarkeit von Bedienelementen, der Auslegung von Armauflagen sowie Freigängen und der Bewegungsfreiheit im Innenraum zu verwenden. Die Wirksamkeit der technischen Erweiterung sollte anschließend geprüft werden.

Stanney et al. hielten fest:

To justify the use of VE technology for a given task, when compared to alternative approaches, the use of a VE should improve task performance when transferred to the real-world task because the VE system capitalizes on a fundamental and distinctively human sensory, perceptual, information-processing, or cognitive capability (Stanney, Mourant & Kennedy, 1998, S. 330).

Durch eine quantitative Performancemessung können haptische Interfaces hinsichtlich ihrer Eignung und der Kosten für einen bestimmten Einsatzbereich beurteilt sowie untereinander verglichen werden und eine technische Weiterentwicklung kontrolliert werden (Hayward & Astley, 1996). Als Beitrag zum Erkenntnisgewinn der Display-Fidelity-Forschung soll diese Studie die Frage beantworten, ob vibrotaktilen Feedback mit leichten, kabellosen Devices die Erlebbarkeit von virtuellen Prototypen steigern und die Absicherung von Fahrzeuginnenräumen sinnvoll ergänzen kann.

In den folgenden Abschnitten werden die der Studie zugrundeliegenden theoretischen Grundlagen (5.1) beschrieben und zentrale Begriffe definiert, die Forschungshypothesen (5.2) formuliert, die Untersuchungsmethode (5.3) dargestellt sowie die Ergebnisse (5.4) genannt und diskutiert (5.5).

5.1 Theoretische Grundlagen und Begriffsdefinitionen

Als Grundlage der Teilstudie zur Erhöhung der haptischen *Display Fidelity* (Abschnitt 2.1.1) werden in den folgenden Abschnitten die Bedeutung des haptischen Renderings in *immersiven virtuellen Umgebungen* aufgezeigt (5.1.1) wie auch die Grundlagen der haptischen Wahrnehmung (5.1.2) dargestellt. Es werden die Möglichkeiten zu deren Stimulation in *immersiven virtuellen Umgebungen* skizziert (5.1.3), ein Überblick über haptische Absicherungsaspekte in virtuellen Fahrzeuginnenräumen (5.1.4) gegeben sowie die Bedeutung und Funktion der zugrundeliegenden Kollisionsverarbeitung (5.1.5) erläutert.

5.1.1 Haptisches Rendern

Haptisches Rendern beschreibt den Prozess der Erzeugung von haptischen Sinnesreizen sowie deren Übertragung auf die Nutzenden mit dem Ziel, haptische Informationen über virtuelle Objekte zu übermitteln (Salisbury, Conti & Barbagli, 2004, S. 24).

Das Ziel dabei ist es, dem Benutzer zu ermöglichen, virtuelle Objekte in einer simulierten Umgebung berührbar zu machen. Das kann dazu dienen, diese durch Berührung erfüllen oder manipulieren zu können. Im Gegensatz zur Visualisierung oder der Auralisierung funktioniert haptisches Rendern bidirektional (Salisbury et al., 2004, S. 25) und beinhaltet einen wechselseitigen Austausch von Informationen

(siehe Abbildung 28) in Form von mechanischer Energie (Hayward & Astley, 1996, S. 2). Es erweitert somit die Grenzen der möglichen subjektiven Benutzererfahrung in der simulierten Umgebung. Untersuchungen zeigen, dass multisensorisches Feedback (also die Stimulationen mehrerer Sinneskanäle) in IVU sowohl das Presence-Gefühl als auch die Task-Performance (Kammermeier et al., 2001; Sallnäs et al., 2000) steigern kann. Eine höhere Presence wiederum führt unter Umständen zum realistischen Verhalten der Benutzerinnen und Benutzer in der IVU und steigert die Chance, dass sie sich in dieser genauso verhalten würden wie in der Realität (Slater, Steed & Usoh, 2013). Letzteres bezieht sich auf Aufgaben, deren Erfüllung generell von einer räumlichen *Presence* begünstigt wird (Stanney et al., 1998).

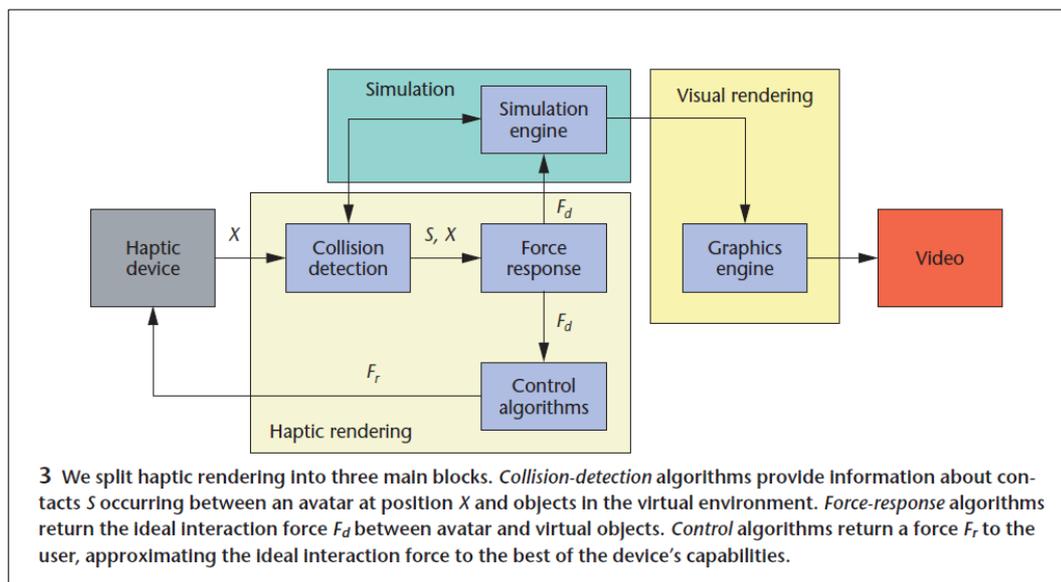


Abbildung 28: Funktionsweise des haptischen Renderings nach Salisbury (2004).

Quelle: Salisbury et al. (2004, S. 24).

Die Erzeugung der, im Folgenden als *haptisches Feedback* bezeichneten, haptischen Reize, stellt zusätzliche Anforderungen an das Simulationssystem. Dazu gehören eine schnelle und präzise Berechnung komplexer Kollisionssituationen und der dabei entstehender Kräfte (Burdea, 2000; Sanchez-Vives & Slater, 2005). Dies ist notwendig, damit es den Nutzenden möglich ist, die Kollision zeitlich wie auch räumlich zuordnen zu können (Burdea, 2000; Sanchez-Vives & Slater, 2005). Weiterhin bedarf das Simulationssystem eines haptischen Interfaces mit zwei wesentlichen Merkmalen: Der Möglichkeit zur Übertragung mechanischer Signale auf den Körper von nutzenden Personen und der Erfassung mechanischer – vom Körper

ausgehenden – Signale in Form von Kraft, Verschiebung oder einer Kombination aus beiden (Hayward & Astley, 1996, S. 4).

Die Übertragung mechanischer Signale auf eine nutzende Person zielt auf die haptische Wahrnehmung des Menschen ab. Bevor die Konzepte haptischer Feedback-Devices diskutiert werden, folgt eine Skizzierung der Grundlagen haptischer Wahrnehmung.

5.1.2 Haptische Wahrnehmung

Haptische Wahrnehmung bezeichnet die Wahrnehmung, bei der sowohl die taktile als auch die kinästhetische Wahrnehmung relevante Informationen zu Objekten oder Ereignissen liefern (Hayward & Astley, 1996; Loomis & Lederman, 1986). Durch die Kombination beider Sinnesmodalitäten erhöht sich die Präzision der Wahrnehmung (Louw, Kappers & Koenderink, 2000). Beide Wahrnehmungskanäle sollen im Nachfolgenden erläutert und in den Kontext der Arbeit eingeordnet werden.

Taktile Wahrnehmung bezieht sich auf die Wahrnehmung, die allein durch Hautstimulation vermittelt wird (Loomis & Lederman, 1986). Bei intendierter oder zufälliger Berührung eines Gegenstandes ermöglichen verschiedene in der Haut liegende Rezeptoren das Erleben von *Objekteigenschaften* (bspw. von Druck, Textur, Punktion, thermischen Eigenschaften, Weichheit, Nässe etc.) sowie von *Objektmerkmalen* (bspw. von Form, Kanten, Erhebungen und Vertiefungen) und auch von *vibrotaktilen Reizen* (Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant & Robles-De-La-Torre, 2004).

Die hierfür zuständigen *Mechanorezeptoren* werden entsprechend ihrer Adaptionsgeschwindigkeit infolge eines Reizes in langsam und schnell adaptierende Rezeptoren unterteilt (Kaczmarek, Webster, Bach-y-Rita & Tompkins, 1991, S. 3) und befinden sich in der Oberhaut *Epidermis* und Unterhaut *Subkutis* (Goldstein, 2010, S. 331). Die als *slow adapting* „SA“ klassifizierten Rezeptoren feuern kontinuierlich bei anhaltendem Druck Signale aus. *Fast adapting* „FA“ Rezeptoren hingegen feuern beim Einsetzen und Beenden eines Druckreizes. Dabei befinden sich in jeder der genannten Hautschichten jeweils ein Typ der SA und FA Rezeptoren. In der Oberhaut sind es die *Merkel-Zellen* „SA1“, die dem Menschen die Unterscheidung feiner Details ermöglichen und die *Meissner-Körperchen* „FA1“, welche für die

Steuerung der Greifkraft zuständig sind (Goldstein, 2010, S. 331). In der Unterhaut sind es die *Ruffini-Körperchen* „SA2“, welche auf Dehnung der Haut reagieren und die *Pacini-Körperchen* „FA2“ oder „PC“, welche auf Vibrationen oder beim Überstreichen von feinen Strukturen feuern (Goldstein, 2010, S. 332). Die im weiteren Verlauf beschriebenen taktilen Feedback-Devices zielen auf die Stimulation einzelner oder mehrerer dieser Rezeptoren ab.

Die darüber hinaus gehende Möglichkeit des Schmerzempfindens der Haut wird aufgrund des fehlenden Bezugs zur vorliegenden Arbeit an dieser Stelle nicht thematisiert (für einen Überblick siehe Goldstein, 2010, S. 343 ff.).

Kinästhetische Wahrnehmung bezeichnet die Sinneswahrnehmung, die ausschließlich oder fast ausschließlich durch kinästhetische Stimulation vermittelt wird (Loomis & Lederman, 1986). Sie ermöglicht ein Bewusstsein für den eigenen Körperzustand durch Rezeptoren des Bewegungsapparates in Gelenken, Muskeln und Sehnen. Diese liefern Informationen über *Lage* (anhand von Gelenkstellungen), *Kraft* (anhand der Muskel- und Sehnenspannung) und *Bewegungsempfindung* (anhand der Richtung der Bewegung) (Hayward et al., 2004). Aus diesen Informationen lässt sich bspw. die Größe eines Objektes bestimmen, wenn dieses zwischen den Fingern gehalten wird (Loomis & Lederman, 1986, S. 3). Die hierbei entstehende taktile Information liefert hingegen einen Eindruck über den Kontakt zum Objekt, jedoch nicht zu seiner Größe.

5.1.3 Haptische Feedback-Devices

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird *haptisches Feedback* als die auf Computersimulation basierte Stimulation der taktilen und kinästhetischen Wahrnehmung verstanden. Die auf taktile Wahrnehmung ausgelegte, computergestützte Stimulation wird im Folgenden als *taktilen Feedback* und die auf kinästhetische Wahrnehmung ausgelegte Stimulation als *Force-Feedback* bezeichnet.

Taktilen Feedback in IVU dient der Übertragung von Informationen über Oberflächenkontakt (bspw. durch mechanische Deformation oder Vibration) aber auch zur Form, Glätte, Schlupf und Temperatur von virtuellen Objekten. Mithilfe von Force-Feedback können Härte, Gewicht und Trägheit solcher Objekte simuliert werden (Burdea, 1999; Salisbury et al., 2004). Die im Versuch verwendeten *VibroTac*-Armbänder (5.3.2.2) liefern taktiles Feedback in Form von Vibrationsimpulsen.

Die Übertragung haptischer Stimuli auf den menschlichen Körper erfordert entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstellen, die als *Haptic Displays* bezeichnet werden (Hayward & Astley, 1996). Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, ist computergestützte haptische Stimulation, im Gegensatz zur visuellen oder akustischen, bidirektional. Haptische Mensch-Maschine-Schnittstellen in der IVU erfüllen häufig die Doppelfunktion eines Ein- und Ausgabegerätes. Daher wird ihnen die in der Literatur häufig verwendete Bezeichnung *Haptic Display* im Zusammenhang mit der IVU in der Regel nicht vollständig gerecht, da der Begriff eine unidirektionale Informationsübertragung suggeriert (Hayward & Astley, 1996). Es wird daher im Folgenden der Begriff *Feedback-Device* synonym verwendet werden.

Hayward & Astley (1996) hielten fest:

To summarise, bidirectionality is the single most distinguishing feature of haptic devices when compared to other machine interfaces (Hayward & Astley, 1996, S. 2).

Haptische Feedback-Devices können als physische Instrumente ausgelegt sein oder als mit den Nutzenden verbundene Exoskelette (Sanchez-Vives & Slater, 2005, S. 332 ff.). Die physische Verbindung zwischen einer nutzenden Person und einem haptischen Feedback-Device wird als *Device-Body-Interface* bezeichnet (Hayward & Astley, 1996, S. 4; Salisbury et al., 2004, S. 25) und kann einseitig (*unilateral*), vom System umklammernd (*bracing*) oder durch das Halten (*held*) hergestellt werden (Hayward & Astley, 1996, S. 4).

Force-Feedback-Devices zur Stimulation der kinästhetischen Wahrnehmung übertragen physikalische Kräfte und Momente auf den Benutzer (Burdea, 1999, S. 2). Hierzu müssen sie einerseits entweder am Körper von Nutzenden oder an Hilfsstrukturen verankert werden und andererseits entsprechend robust konstruiert sein (Burdea & Coiffet, 2003, Kap. 3.3.3; Hayward & Astley, 1996, S. 1). Je größer die zu übertragenden Kräfte sind, desto schwerer, komplexer und teurer ist der Aufbau. Soll zum Beispiel die Armbewegung der Benutzerin oder des Benutzers gestoppt werden, muss das System eine entsprechende Steifigkeit und mechanische Reaktionsgeschwindigkeit aufweisen. Die mechanische Reaktionsgeschwindigkeit bezeichnet in diesem Fall die Geschwindigkeit, mit der das System die eigene Masse beschleunigen kann. Tragbare und am Körper befestigte Geräte könnten durch ihre konstruktive Beschaffenheit zur Ermüdung oder Unbehagen der Nutzenden führen.

Weiterhin muss die mechanische Reibung im System geringer sein als die kleinste darzustellende Kraft, da sonst die aus der Simulation erzeugten Stimuli vom System herausgefiltert werden. Force-Feedback-Devices dienen überwiegend der kinästhetischen Stimulation, produzieren allerdings durch den Hautkontakt zwangsweise auch taktile Stimuli (Visell, 2009, S. 5 ff.).

Taktile-Feedback-Devices übertragen Informationen über verschiedene Arten der Hautstimulation (für einen Überblick siehe Jones & Sarter, 2008; Visell, 2009). Hierzu gehört die mechanische Deformation sowie die vibrotaktile, elektrotaktile und thermale Stimulation der Haut (Visell, 2009, S. 5 ff.):

- Bei der *mechanischen Deformation* (mit niedriger Frequenz und geringer Amplitude) werden Objekte gegen die Hautoberfläche gepresst. Durch die Verformung der Haut lassen sich entstandene, gelöste oder andauernde Kontakte zu diesen Objekten unterscheiden.
- Bei der *vibrotaktile Stimulation* vibrieren Objekte mit einer höheren Frequenz (bis ca. 250 Hz) gegen die Haut (Jones & Sarter, 2008). Hierbei werden die *Pacini-Körperchen* angesprochen (Kaczmarek et al., 1991, S. 3) und die Vibration als solche wahrgenommen (siehe 5.1.2).
- Bei der *elektrotaktile Stimulation* werden elektrische Ströme durch die Haut geleitet (Kaczmarek et al., 1991). Bei dieser Art der taktilen Stimulation werden die Nerven direkt angeregt, ohne den Umweg über die Mechanorezeptoren zu gehen. Der Strom kann über die Hautoberfläche oder eingelassene feine Drähte zugeführt werden (Visell, 2009, S. 5). Elektrotaktile Stimulation kann ein breites Spektrum an Empfindungen hervorrufen. Dazu gehören Juckreiz, Kribbeln, Vibration, Brummen, Berührung, Druck, Kneifen oder Schmerz (Visell, 2009, S. 6).
- Bei der *thermalen Stimulation* wird Wärme über ein Medium, Konvektion oder Strahlung auf die Haut übertragen oder dieser entzogen.

Moderne Taktile-Feedback-Devices sind vergleichsweise kleiner, leichter und verfügen über eine höhere Auflösung des Feedbacks, als es in der Vergangenheit möglich war. Auch ihre Entwicklung ist durch den technologischen Fortschritt einfacher geworden, wodurch sich eine Vielzahl an Anwendungsfällen eröffnet (Visell, 2009, S. 3). Da keine Übertragung von großen physikalischen Kräften und Momenten auf die Nutzenden vonnöten ist, können Taktile-Feedback-Devices kleiner und leichter

konstruiert werden als Force-Feedback-Devices. Dies macht ihre Anwendung in IVU besonders attraktiv, da sie unauffälliger eingesetzt werden können und die Nutzerinnen und Nutzer damit weniger an die reale Umgebung erinnern bzw. von der virtuellen ablenken.

Weiterhin kann das Taktile-Feedback in einem physischen Instrument (bspw. einem Zeigestock) integriert sein, welches in der virtuellen Umgebung visuell dargestellt wird. Die Nutzenden nehmen hierbei eine Kollision des virtuellen Instruments mit Objekten über das physische Instrument wahr (Sanchez-Vives & Slater, 2005, S. 333). Eine alternative Möglichkeit ist die Verwendung ohne virtuelle Repräsentation des Feedback-Devices. Die Nutzerinnen und Nutzer sehen in der IVU ihren eigenen Avatar, jedoch nicht das Feedback-Device. Berührt der Avatar nun virtuelle Objekte, wird dies vom Feedback-Device signalisiert. Sieht der Mensch lediglich seinen Avatar und das berührte Objekt, so schreibt er die auf der Haut verspürten Stimuli dem berührten Objekt zu statt dem Feedback-Device. Dieser Vorgang wird als *Externalisierung* bezeichnet (Loomis & Lederman, 1986, S. 4).

Taktile Stimulation kann auch im Rahmen einer *sensorischen Substitution* eingesetzt werden. Dabei übersetzt ein System sensorische Informationen einer Sinnesmodalität auf eine andere (Visell, 2009, S. 2). Dies geschieht bspw. bei der Brailleschrift, bei welcher ursprünglich visuelle aufbereitete Textinformationen in taktile wahrnehmbare überführt werden, um über den Hautkontakt gelesen werden zu können. Taktile-Feedback-Devices können auf diese Art und Weise bspw. dazu eingesetzt werden, blinde Menschen bei der räumlichen Navigation zu unterstützen (Weber, Schätzle, Hulin, Preusche & Deml, 2011).

5.1.4 Haptische Absicherungsaspekte in Fahrzeuginnenräumen

Viele Aspekte eines Fahrzeuginnenraums werden vom Kunden über haptische Wahrnehmung erfahren. Darunter fallen bspw. Sitzkomfort, Bewegungsfreiheit, Materialgefühl, Bequemlichkeit von Armauflagen und Beinanlageflächen, die Erreichbarkeit von Bedienelementen sowie deren mechanische Bedienbarkeit. Reize, die durch haptische Feedback-Devices stimuliert werden sollen, basieren auf physikalischen Modellen einer virtuellen Umgebung. Durch haptisches Rendern (Abschnitt 5.1.1) können solche Eigenschaften für die Absicherung (Abschnitt 3.1.3)

in IVU dargestellt werden. Es gilt jedoch abzuwägen, über welchen haptischen Absicherungsumfang ein System zu welchem Zeitpunkt in der Produktentwicklung verfügen soll.

Neben entsprechenden Feedback-Devices (Abschnitt 5.1.3) werden auch physikalische Modelle der zu simulierenden Eigenschaften benötigt, die in einer frühen Phase nicht zwangsläufig vorhanden sind, da die zu Grunde liegenden Bauteile sich ebenfalls noch in einer frühen Entwicklungsphase befinden. Des Weiteren ist jedes haptische Feedback-Device stets eine imperfekte Schnittstelle, die die Nutzenden in ihrem natürlichen Verhalten beeinflusst. Der Versuch, einen möglichst vollständigen Fahrzeuginnenraum durch haptische Feedback-Devices zu rendern, würde mit der derzeit verfügbaren Technik zu einem technischen Aufbau führen, der durch seine Komplexität schnell an die Grenzen der Wirtschaftlichkeit stößt. Auch widerspricht ein zu komplexer und teurer Aufbau der Idee, eine Vielzahl physischer Prototypen mit einem immersiven Simulationssystem zu ersetzen, da eine zunehmende Komplexität mit abnehmender Flexibilität und steigenden Kosten verbunden ist. Aus den genannten Gründen werden deshalb häufig Systeme aufgebaut, die Teilaspekte haptisch abbilden können und einen Kompromiss zwischen benötigter Flexibilität des Systems und immanenter Komplexität bilden.

Die Absicherung von virtuellen Prototypen in IVU findet häufig in sog. *Sitzkisten* statt (Bubb et al., 2015, S. 590). Sie bilden einen minimalen Sitzplatz im Fahrzeug ab und bestehen oftmals aus einem Fahrzeugsitz, einem Lenkrad und Pedalerie (siehe Abbildung 12, S. 25). Diese drei Grundelemente eines Fahrzeugs lassen sich je nach Aufbau manuell oder computergestützt verstellen, um verschiedene Innenraumproportionen abbilden zu können (Bubb et al., 2015, S. 591–592).

Bei der haptischen Simulation eines Innenraums erhalten Nutzende demnach haptische Eindrücke, die sowohl vom haptischen Rendering als auch von für den Sitzkistenaufbau verwendeten Fahrzeugkomponenten herrühren.

Je nach Anwendungsfall ist es prinzipiell denkbar und erwünscht, auch diese physischen Fahrzeugelemente durch haptische Feedback-Devices zu simulieren. Die Bewegungen eines Lenkrades lassen sich bspw. mit einem entsprechenden Force-Feedback-Aufbau simulieren (Abbildung 29), ohne dass die Benutzerin oder der Benutzer ein physikalisch vorhandenes Lenkrad bewegen müsste. Hier entscheidet

der Anwendungsfall, ob bspw. die physische Form und Beschaffenheit des Lenkrades oder dessen Bewegungsmuster im Vordergrund der haptischen Absicherung stehen sollen.



Abbildung 29: Beispieldarstellung einer Sitzkiste mit Force-Feedback-Aufbau.

Quelle: Hayward et al. (2004, S. 24).

Innerhalb dieser Teilstudie wurde eine universelle technische Lösung für die haptische Innenraumabsicherung prototypisch umgesetzt, welche Kollisionen innerhalb des Fahrzeuginnenraums als Grundlage für haptische Wahrnehmung implementiert. Dadurch lässt sich das Verfahren flexibel in verschiedenen IVU einsetzen.

5.1.5 Kollisionserkennung und -verarbeitung

Für die prototypische Umsetzung einer Methode zur haptischen Erlebbareit eines Fahrzeuginnenraums bedarf es einer Kollisionserkennung zwischen virtuellen Ob-

jekten und nutzergesteuerten Eingaben innerhalb der VR-Software. Das in der Untersuchung verwendete VR-System (Abschnitt 2.2.4) stellte eine approximative, auf Axis-Aligned-Bounding-Box (AABB) basierte Kollisionserkennung zur Verfügung, deren Informationen sich über eine Schnittstelle zur Ansteuerung von Feedback-Devices verwenden lassen. Diese Lösung wurde im Vorfeld der Untersuchung hinsichtlich der systembedingten Vor- und Nachteile für die prototypische Nutzung in der Studie untersucht und für geeignet befunden.

Folgend wird die grundsätzliche Funktionsweise einer AABB-Kollisionserkennung beschrieben (für einen allgemeinen Überblick siehe Weller, 2013) sowie die für die Arbeit relevanten Vor- und Nachteile der vorhandenen Lösung diskutiert.

Unter Kollisionserkennung (engl. collision detection) wird der Kontakt oder die Überschneidung zweier oder mehrerer geometrischer Objekte im zwei- oder dreidimensionalen Raum verstanden. Die Erkennung von Kollisionen wird als Grundlage für das haptische Rendern verwendet (Burdea, 2000, S. 3 f.). Hierbei ist es insbesondere für immersive Umgebungen wichtig, eine möglichst geringe Latenz bei der Berechnung zu erreichen. Die Berechnungsgeschwindigkeit und Präzision sind in der Anwendung zwei wichtige Faktoren, die sich gegenseitig beeinflussen. Je mehr Objekte eine 3D-Szene beinhaltet, desto rechnerintensiver wird die Berechnung (Burdea & Coiffet, 2003, S. 182).

Es lässt sich zwischen approximativen und exakten Algorithmen zur Kollisionserkennung unterscheiden (Lin, Manocha, Cohen & Gottschalk, 1996). Approximative Verfahren lassen sich schneller berechnen, sind jedoch gegenüber exakten ungenauer in der Kollisionserkennung.

Anwendungen erzeugen zur Reduktion der benötigten Rechenzeit und -leistung während der Simulation zunächst in einer sog. *broad phase* eine Auswahl von potentiell miteinander kollidierenden Objekten (engl. *potentially collision set*). Diese Phase verwendet approximative Algorithmen auf der Basis von vereinfachten Hüllkörpern (engl. *bounding volumes*) (Lin et al., 1996, S. 130; Weller, 2013, S. 12). Dadurch muss in der anschließenden sog. *narrow phase* eine exakte Kollisionsberechnung, nur auf eine reduzierte Anzahl von Szenenobjekte ausgeführt werden (Weller, 2013, S. 9).

Im Anschluss an eine erkannte Kollision findet im Allgemeinen eine Form der Kollisionsverarbeitung statt. Dieser Schritt dient bspw. dazu, physikalische Kräfte zu

berechnen, die auf ein Force-Feedback-Device übertragen werden (Salisbury et al., 2004) oder um eine einfache Signalisierung des Kollisionskontakts mehrerer Objekte durchzuführen (Weller, 2013, S. 12), wie es in der vorliegenden Studie Anwendung fand (siehe Abschnitt 5.3.2.3).

Eine mögliche Form dieser vereinfachten Hüllkörper stellen *Bounding-Boxen* dar (Burdea & Coiffet, 2003, S. 181 ff.). Eine Bounding-Box ist ein quader- oder würfelförmiger Hüllkörper, der alle Ecken eines gegebenen 3D-Objekts umschließt (Burdea & Coiffet, 2003, S. 181). Bounding-Volumen lassen sich zwischen kugelförmigen oder polytopen Hüllkörpern (siehe Abbildung 30) einordnen (Weller, 2013, S. 12).

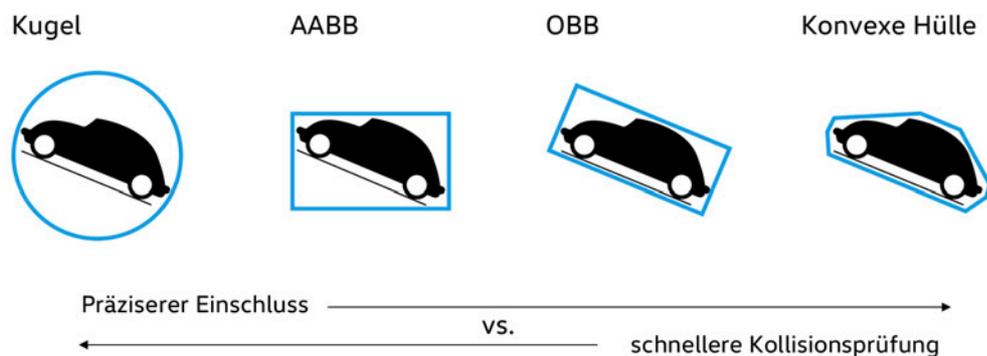
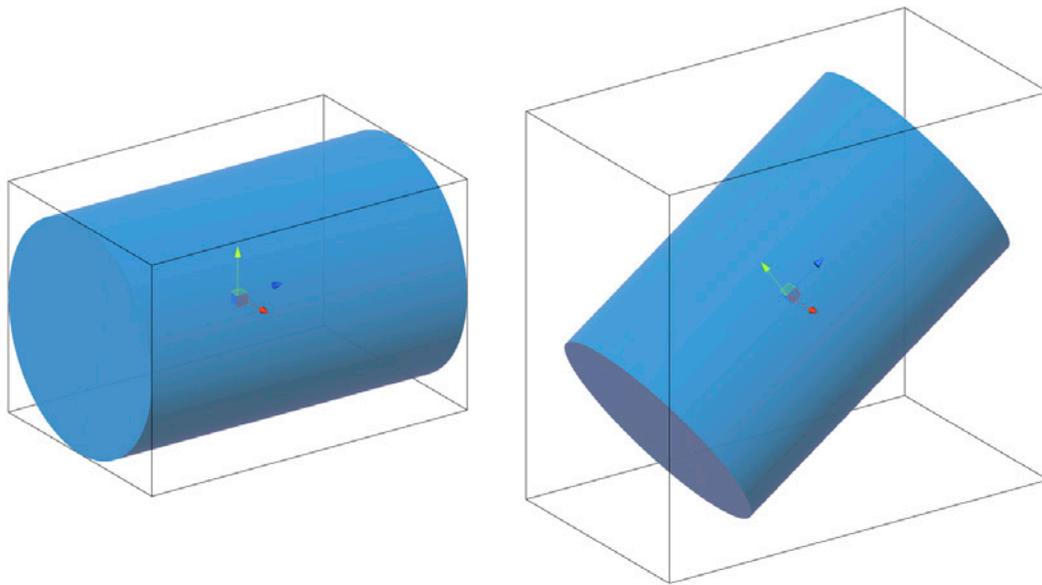


Abbildung 30: Verschiedene Formen von Hüllkörpern (blau) in Abhängigkeit zur Präzision des Einschusses eines Objekts sowie der Dauer der Kollisionsprüfung. Quelle: Eigene Darstellung.

Bounding-Boxen unterteilen sich wiederum in Axis-Aligned-Bounding-Boxen (AABB) und Oriented-Bounding-Boxen (OBB) (Burdea & Coiffet, 2003, S. 181).

AABB verbleiben stets achsparallel zum Weltkoordinatensystem, während das von ihnen umschlossene Objekt rotiert, und passen ihre Ausmaße so an, dass das Objekt weiterhin umschlossen bleibt (Abbildung 31). Sie lassen sich schneller berechnen als OBB, überschätzen jedoch mitunter die Ausmaße eines rotierten Objekts deutlich.

OBB rotieren mit dem umschlossenen Objekt mit und bieten dadurch eine exaktere Approximation (Burdea & Coiffet, 2003, S. 182).



(a) AABB eines Zylinders

(b) Ausdehnung der AABB durch Rotation des Zylinders

Abbildung 31: Beispieldarstellung der Veränderung einer variablen Axis-Aligned-Bounding-Box bei Objektrotation. Quelle: Eigene Darstellung.

Eine approximative, auf Bounding-Boxen basierende Kollisionserkennung – wie sie in dieser Arbeit Verwendung fand – erkennt eine Kantenüberschneidung mehrerer Bounding-Boxen (Burdea & Coiffet, 2003, S. 180) anstatt der Überschneidung der tatsächlichen Objektoberflächen. Daraus resultiert eine weniger genaue und unter Umständen verfrühte Kollisionserkennung (siehe Abbildung 32). Diesem Nachteil steht eine kürzere Berechnungszeit als Vorteil entgegen.

Dem Nachteil der Ungenauigkeit der AABB-basierten Kollisionserkennung wurde im Versuch mithilfe einer Nachbildung der Oberflächen im virtuellen Fahrzeuginnenraum durch achsparallele Hilfsobjekte entgegengewirkt (siehe 5.3.2.4).

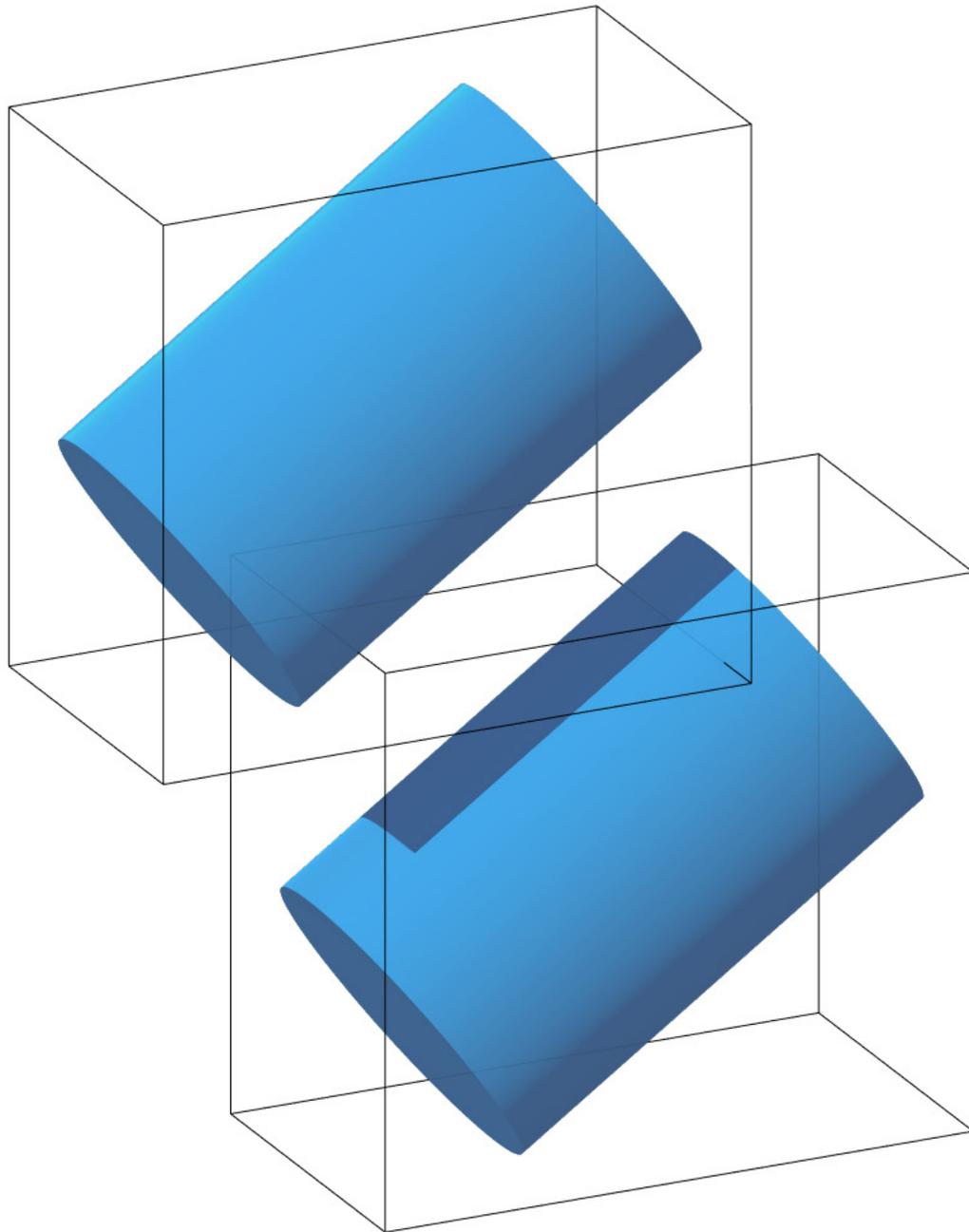


Abbildung 32: Beispieldarstellung einer verfrühten Kollisionserkennung durch Überschneidung der Bounding-Boxen mit AABB-Algorithmus.

Quelle: Eigene Darstellung.

5.2 Forschungshypothesen

Für die Untersuchung, inwiefern sich die Verwendung von kabellosen vibrotaktilen Armbändern auf die Beurteilung von immersiven virtuellen Fahrzeuginnenräumen auswirkt, wurden insgesamt drei Forschungshypothesen aufgestellt und überprüft.

5.2.1 Einfluss der Kollisionsrückmeldung auf die Effizienz der Beurteilungsaufgabe

Die virtuelle Innenraumbewertung unter praxisnahen Bedingungen sollte durch das vibrotaktile Feedback – gegenüber der etablierten Methode mit visuellem Kollisionsfeedback – nicht an Effizienz abnehmen. Die Teilnehmenden der Vorstudie benannten hierbei das Defizit an haptischer Rückmeldung in VR (3.4.2). Der Forschungsstand (2.1.3) legt nahe, dass sich die Task-Performance durch zusätzliche Sinnesmodalitäten (d.h. eine höhere *Display Fidelity*) verbessert, insofern diese für die Aufgabenerledigung erforderlich sind (Stanney et al., 1998). Davon ausgehend wurde folgende Hypothese aufgestellt:

H1: Die *Effizienz der Beurteilung* von haptischen Eigenschaften im virtuellen Fahrzeuginnenraum mit vibrotaktilen Feedback ist höher als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung.

5.2.2 Einfluss der Kollisionsrückmeldung auf die empfundene Realitätsnähe der Simulationsumgebung

Ein weiteres Ziel bei der Erhöhung der *Display Fidelity* ist die Steigerung der empfundenen Realitätsnähe. Durch eine höhere Realitätsnähe sollen sich die Benutzenden bei der Aufgabenerfüllung in der IVU so verhalten, wie sie es in der Realität tun würden (Bystrom et al., 1999; Slater, Linakis, Usoh & Kooper, 1995). Da es sich bei der *Display Fidelity* um die Eigenschaft des Systems handelt, Sinnesreize möglichst realitätsgetreu zu reproduzieren, sollte die Integration des vibrotaktilen Feedbacks zu einer gesteigerten empfundenen Realitätsnähe führen. Daher wurde die folgende Hypothese überprüft:

H2: Die *empfundene Realitätsnähe* der virtuellen Fahrzeuginnenraumdarstellung mit vibrotaktilen Feedback ist höher als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung.

5.2.3 Eignung des vibrotaktilen Kollisionsfeedbacks für die Beurteilung haptischer Eigenschaften

Zuletzt sollte geprüft werden, ob Benutzerinnen und Benutzer die neue Methode des Kollisionsfeedbacks als Hilfestellung bei der Beurteilung von haptischen Eigenschaften eines Fahrzeuginnenraums empfinden. Aufgrund dessen, dass haptische Innenraumeigenschaften an der untersuchten *virtuellen Sitzkiste* (2.2.4) rein visuell beurteilt wurden und durch das prototypisch integrierte vibrotaktile Feedback taktil erlebt werden konnten, wurde postuliert:

H3: Die *empfundene Eignung* des vibrotaktilen Feedbacks bei der Beurteilung der virtuellen Fahrzeuginnenraumdarstellung ist höher als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung.

5.3 Methode

Im Folgenden wird die methodische Herangehensweise, darunter das Untersuchungsdesign (5.3.1), die Versuchsapparatur und Operationalisierung der unabhängigen Variablen (5.3.2), die Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung der abhängigen Variablen (5.3.3), die Rekrutierung der Versuchspersonen (5.3.4) und die endgültige Stichprobe (5.3.5) sowie die Untersuchungsdurchführung (5.3.6) und die Datenanalyse (5.3.7), im Detail dargestellt.

5.3.1 Design

Zur Untersuchung der Forschungshypothesen wurde eine quasi-experimentelle Laboruntersuchung (Hager, 1987, S. 71–73) im *Between-Subject-Design* nach einem unifaktoriellen Mehrstichprobenversuchsplan mit drei Versuchsgruppen $Q - 3$ durchgeführt (Sarris, 1992, S. 59–83).

	Versuchsgruppe	Vorher-Messung	Treatment X Display Fidelity des Kollisionsfeedbacks (UV)	Nachher-Messung
Q	1	-	X ₁ „visuelles Kollisionsfeedback“	\bar{Y}_{1a} nach \bar{Y}_{1b} nach \bar{Y}_2 nach \bar{Y}_3 nach
	2	-	X ₂ „vibrotaktilen Kollisionsfeedback“	\bar{Y}_{1a} nach \bar{Y}_{1b} nach \bar{Y}_2 nach \bar{Y}_3 nach
	3	-	X ₃ „kombiniertes Kollisionsfeedback“	\bar{Y}_{1a} nach \bar{Y}_{1b} nach \bar{Y}_2 nach \bar{Y}_3 nach
AV _{1a} : Kollisionen während der Innenraumbewertung (\bar{Y}_{1a}) AV _{1b} : Gesamtdauer der Innenraumbewertung (\bar{Y}_{1b}) AV ₂ : Index Realitätsnähe (\bar{Y}_2) AV ₃ : Index Eignung für haptische Bewertung (\bar{Y}_3)				

Abbildung 33: Versuchsplan der Quasi-Experimentellen Laboruntersuchung zur Steigerung der Display Fidelity von virtuellen Prototypen durch vibrotaktilen Feedback. Quelle: Eigene Darstellung.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Versuchsausrüstung und Operationalisierung der unabhängigen Variablen (5.3.2) *Display Fidelity des Kollisionsfeedbacks* (UV) sowie die Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung (5.3.3) der abhängigen Variablen *Anzahl von Kollisionen während der Innenraumbewertung* (AV1a), *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* (AV1b), *Index Realitätsnähe* (AV2) und *Index Eignung für haptische Bewertung* (AV3).

5.3.2 Versuchsausrüstung und Operationalisierung der unabhängigen Variablen

Zur Durchführung der Untersuchung wurde das bereits in den anderen Studien verwendete VR-System *virtuelle Sitzkiste* (siehe Abschnitt 2.2.4) in zum Versuchszeitpunkt folgender Systemkonfiguration (5.3.2.1) verwendet. Zur Nutzung des vibrotaktilen Kollisionsfeedbacks wurden zwei vibrotaktile Armbänder an das System angeschlossen (5.3.2.2) und eine eigene Ansteuerung für die VR-Software pro-

grammiert (5.3.2.3). Zuletzt wurde das Stimulusmaterial angepasst und insbesondere das Modell des immersiven virtuellen Fahrzeuginnenraums um kollisionsauslösende Informationen erweitert (5.3.2.4). Abschließend wird die Operationalisierung der unabhängigen Variablen beschrieben (5.3.2.5).

5.3.2.1 Versuchsaapparatur

Die Untersuchung wurde mittels der in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen *virtuellen Sitzkiste* und folgender Systemkonfiguration des übrigen VR-Systems durchgeführt: Die Erzeugung der IVU erfolgte mithilfe der Software RTT DeltaGen 12.2 (unter Einbindung der Module *RTT Scale* and *RTT Immersive*). Zur Echtzeitberechnung der Umgebung kamen drei HP Z820 Workstations zum Einsatz. Deren Ausstattung umfasste je zwei Intel Xeon Prozessoren E5-2667 v2 @ 3,3 GHz; 196 GB RAM und zwei Nvidia Quadro K6000 Grafikkarten. Als Betriebssystem kam Windows 7 Enterprise SP1 (64Bit) zum Einsatz. Das optische Trackingsystem ARTTRACK2 wurde gegenüber den vorhergehenden Studien durch das Nachfolgemodell ARTTRACK3 ersetzt.

5.3.2.2 Hardwareseitige Implementierung der vibrotaktilen Kollisionsrückmeldung

Für die Ausgabe der vibrotaktilen Kollisionsrückmeldung kamen zwei kabellose Armbänder des Typs VibroTac von der Firma SENSODRIVE GmbH zum Einsatz. Diese wurden von den Teilnehmenden an beiden Handgelenken getragen (Abbildung 34).

Das VibroTac ist ein neuartiges Gerät in Form eines Armbands, das mittels Vibration (vibrotaktile Stimulation) unterschiedlichste Informationen an den Menschen übermitteln kann. Mehrere elastisch miteinander verbundene Aktoren, die in Frequenz, Amplitude und Signalverlauf separat ansteuerbar sind, erzeugen Vibrationsmuster, die vom Benutzer eindeutig interpretiert werden können (Schätzle, 2014, Abs. 1 f.).



Abbildung 34: Vibrotaktiler Armreif "VibroTac" am Handgelenk eines Nutzers. Quelle: Kamin & Schätzle (2012).

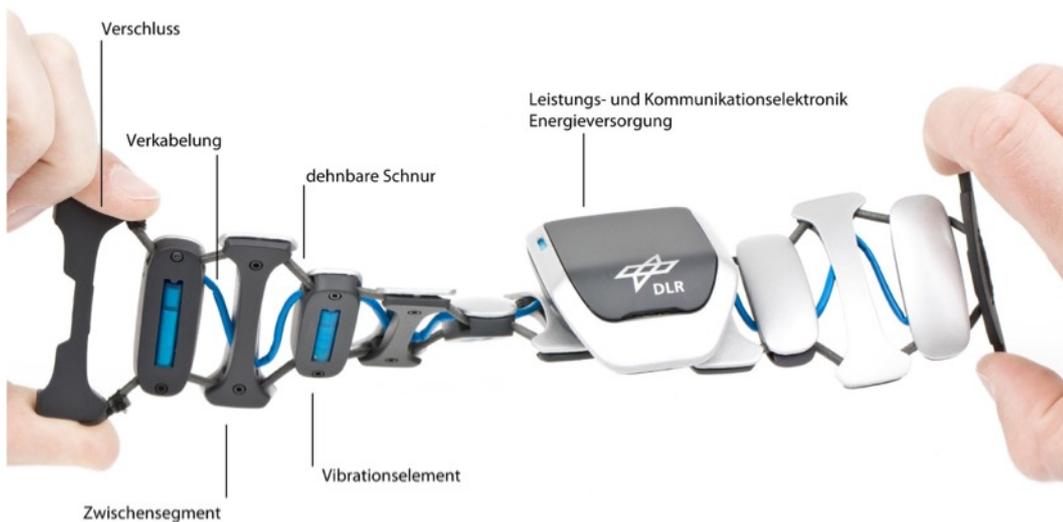


Abbildung 35: Darstellung des Aufbaus und der Komponenten eines VibroTac-Armbandes. Quelle: Kamin & Schätzle (2012).

Um eine Kollisionserkennung zu ermöglichen, wurden die Armbänder in das optische Trackingsystem ARTTRACK3 eingebunden. Hierzu wurden die Deckel der Armbänder modifiziert und Tracking-Targets des Trackingsystems daran befestigt (siehe Abbildung 36). Durch die Tracking-Targets konnte die Position der Armbänder im Raum an das VR-System übertragen und dort in das Fahrzeugkoordinatensystem (Position im virtuellen Fahrzeuginnenraum) umgerechnet werden.



Abbildung 36: VibroTac-Armband mit einem am Deckel befestigten ART-TRACK3-Tracking-Target. Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Berührung mit dem virtuellen Fahrzeuginnenraum empfangen die Armbänder Steuersignale für die einzelnen Vibrationselemente (Aktoren) vom VR-System. Die Verbindung erfolgte drahtlos über das Bluetooth-Protokoll (Version 2.1). Das Gesamtgewicht eines VibroTacs mit Akku und Tracking-Target beträgt circa 100 Gramm.

Dieser prototypische Aufbau erlaubte es, Berührungen in der IVU durch Vibrationen richtungsabhängig zu signalisieren. Im folgenden Abschnitt wird die im Rahmen der Arbeit programmierte, softwareseitige Ansteuerungslogik der Armbänder dargestellt.

5.3.2.3 Softwareseitige Implementierung der vibrotaktilen Kollisionsrückmeldung

Zur Ansteuerung der vibrotaktilen Armbänder muss softwareseitig zunächst eine Kollision von virtuellen Objekten festgestellt und verarbeitet werden, um daraufhin Feedbacksignale auf einem Ausgabegerät zu erzeugen (5.1.5).

Der Standardumfang der im VR-System verwendeten Software RTT DeltaGen beinhaltet keine Funktionalität zur Kollisionserkennung und -verarbeitung. Es existieren jedoch zwei Erweiterungsmodule *RTT Collision Detection* und *RTT Approach Detection*, mit denen sich eine solche Funktionalität prinzipiell abbilden ließe. Beide Erweiterungsmodule sind nicht quelloffen (der Quellcode der Programme wird externen Entwicklern nicht zur Verfügung gestellt), sodass ihr Programmcode im Rahmen dieser Arbeit nicht um eine Ansteuerung von vibrotaktilen Feedback-Device erweitert werden konnte. Für die Ansteuerung der VibroTacs wurde daher eine eigene Softwarekomponente programmiert, welche die Informationen der Kollisionserkennung über eine Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung aufgriff und in entsprechende Ausgabesignale umwandelte.

Für die Entscheidung des zu verwendeten Erweiterungsmoduls zur Kollisionserkennung wurden beide mit ihren Vor- und Nachteilen für diesen Anwendungsfall gegenübergestellt und im Folgenden zusammengefasst.

Das Modul *RTT Collision Detection* bietet eine exakte Kollisionsdetektion unter der Berücksichtigung von komplexen Oberflächenstrukturen der 3D-Objekte. Es stellt jedoch keine Softwareschnittstelle bereit, an der diese Informationen für die Erzeugung der Feedbacksignale und Ansteuerung der Feedback-Devices abgegriffen werden können. Die beiden Ausgabemöglichkeiten des Moduls beschränken sich auf die Einfärbung der miteinander kollidierten Objekte sowie der Meldung im Logfile des Programms. Beide Möglichkeiten kommen für eine Ansteuerung mit möglichst geringen Signallaufzeiten nicht in Betracht.

Das zweite verfügbare Modul *RTT Approach Detection* bietet eine Softwareschnittstelle, mit der die Kollisionsinformation für eine Weiterverarbeitung genutzt werden kann. Es basiert auf einem Bounding-Box-Algorithmus zur Kollisionserkennung, der keine komplexen Oberflächenstrukturen von 3D-Körpern berücksichtigt (siehe 5.1.5). Eine weitere Einschränkung liegt darin, dass lediglich der Erstkontakt zweier Objekte als einmalige Kollision gemeldet wird. Eine Information über anhaltende Kollisionen oder deren Beendigung wird nicht ausgegeben, jedoch für die Ansteuerung der Feedback-Devices benötigt. Diesem Nachteil wurde im Versuch entgegengewirkt, indem zusätzlich die Positionsinformationen des optischen Trackingsystems verarbeitet wurden und somit die Information über einen anhaltenden Kontakt zur Verfügung stand.

Nach der Beurteilung von Vor- und Nachteilen wurde daher beschlossen, das Modul *Approach Detection* prototypisch einzusetzen und den genannten Nachteil der Ungenauigkeit durch die Verwendung von unsichtbaren Hilfsobjekten zu minimieren. Letzteres wird im folgenden Unterkapitel Stimulusmaterial (5.3.2.4) im Detail beschrieben.

Zur Ansteuerung der vibrotaktilen Feedback-Devices wurde im Rahmen der Arbeit ein Softwaremodul entwickelt, das sich als Komponente in ein FlowGraph-System *Logic-Network-Editor* von der VR-Software einbinden und sich in Kombination mit dem Modul *Approach Detection* verwenden lässt. Die Komponente empfängt ein boolesches Eingangssignal „vibriere“ und die Parameter über das anzusteuernde VibroTac, die Adresse von einem oder mehreren anzusteuernenden Aktoren und die Intensität der Vibration. Auf diese Weise kann die Ansteuerungslogik im Flow-Graph-System der VR-Software von den Nutzenden ohne Programmiersprachenkenntnisse erstellt, angepasst oder entfernt werden (Abbildung 37).

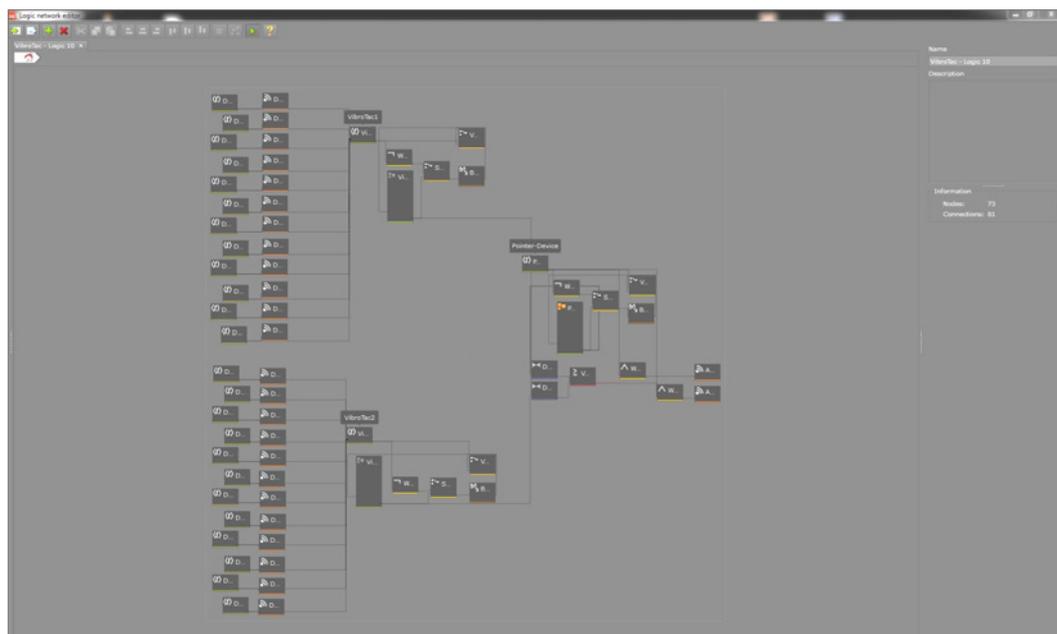


Abbildung 37: Screenshot der programmierten Ansteuerungslogik im Flow-Graph-Systems "Logic-Network-Editor" der VR-Software RTT DeltaGen 12. Quelle: Eigene Darstellung.

Jedes der VibroTac-Armbänder verfügt über sechs Vibrationselemente. Wird das Band am Handgelenk angelegt, verteilen sich die Motoren nahezu gleichmäßig auf der Hautoberfläche des Handgelenks (Abbildung 34, Seite 117). Jedes der Vibrationselemente wurde in der VR-Software durch eine einfache Geometrie (Quader)

abgebildet, die ringförmig, dem getragenen VibroTac entsprechend, angeordnet wurden (Abbildung 38, linke Darstellung).

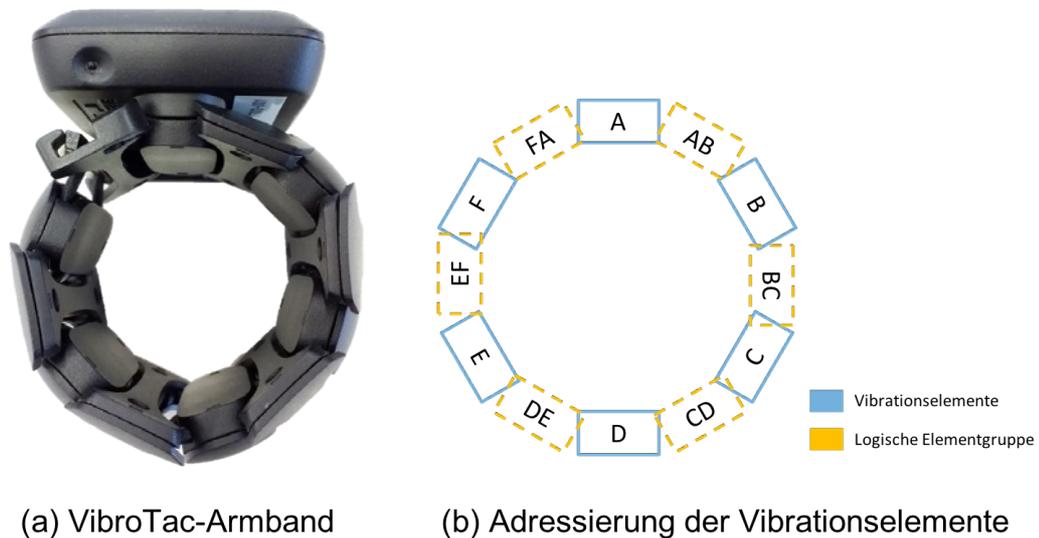


Abbildung 38: Anordnung der VibroTac-Vibrationselemente und Zusammenfassung zu logischen Elementgruppen. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Kollision eines der virtuellen Vibrationselemente mit einer Fläche im virtuellen Fahrzeuginnenraum löste die Vibration am entsprechenden realen Element aus. Für einen gleitenden Übergang der Vibrationsrichtung von Element zu Element, wurden zusätzlich immer zwei benachbarte Elemente zu einer logischen Gruppe zusammengefasst und ein virtuelles Zwischenelement eingebaut, das beide Motoren zum Vibrieren brachte (Abbildung 38, rechte Seite). Auf diese Weise entsteht ein fließender Übergang von Element zu Element, wenn beispielsweise das Handgelenk gedreht wird, während es eine Fläche berührt, da in der Übergangsphase zwischen bspw. Motor A und B, beide zusammen als AB kurzzeitig angesteuert werden. Somit ergeben sich insgesamt zwölf kollisionsauslösende Elemente pro Armband (siehe Abbildung 37 auf S. 120 für einen Überblick und Abbildung 39 für einen Detailausschnitt).

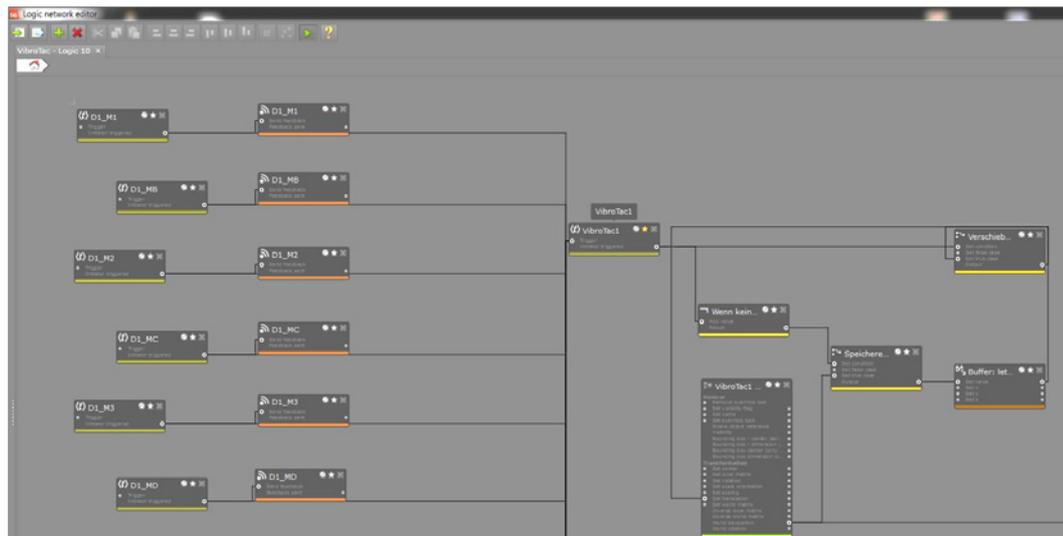


Abbildung 39: Screenshot: Netz zur Ansteuerung der ersten drei physischen Aktoren sowie der logischen Zwischenelemente eines VibroTac im Flow-Graph-System der VR-Software RTT DeltaGen 12. Quelle: Eigene Darstellung.

Erhält die Komponente das Signal zu vibrieren, wertet sie die dazugehörigen Parameter aus und sendet einen Steuerbefehl über einen virtuellen seriellen COM-Port, der vom Bluetooth-Treiber bereitgestellt wird, an das entsprechende vibrotaktile Armband. Das im VibroTac Software-Development-Kit (SDK) enthaltene Kommunikationsprotokoll wurde für kürzere Signallaufzeiten optimiert. Hierzu wurde das Warten auf eine Empfangsbestätigung vom Armband entfernt, was die durchschnittliche Wartezeit zwischen zwei Signalen von 59 auf sechs Millisekunden senkte.

5.3.2.4 Stimulusmaterial

Als Reizmaterial kam der bereits in der zweiten Teilstudie (siehe Abschnitt 4.3.2) verwendete virtuelle Fahrzeuginnenraum in modifizierter Form zum Einsatz (Abbildung 40).



Abbildung 40: Darstellung des verwendeten virtuellen Fahrzeuginnenraums in einer Straßenumgebung. Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Ansteuerung der VibroTac-Armbänder wurde der Innenraum um kollisionsauslösende Informationen erweitert. Hierzu wurden die Oberflächen der zu bewertenden Innenraumelemente mithilfe einfacher geometrischer Hilfsobjekte (Flächen und Quader) nachgebildet, die vom VR-System als kollisionsauslösende Informationen interpretiert wurden. Diese Hilfsobjekte waren für die Nutzenden im Versuch unsichtbar und wurden zu Illustrationszwecken in folgenden Abbildungen gelb hervorgehoben (Abbildung 41).



(a) Fahrzeuginnenraum (b) Hilfsobjekte (c) Überlappungsbereiche

Abbildung 41: Darstellung des (a) virtuellen Fahrzeuginnenraum aus Nutzersicht, (b) der hinzugefügten Hilfsobjekte und der (c) entstehenden Approximation der Innenraumoberflächen im Versuch. Quelle: Eigene Darstellung.

Durch eine räumlich versetzte Anordnung mehrerer achsparalleler Hilfsobjekte wurde eine konvexe Oberflächenkontur für die Kollisionserkennung genauer approximiert als durch eine AABB (Abbildung 42).

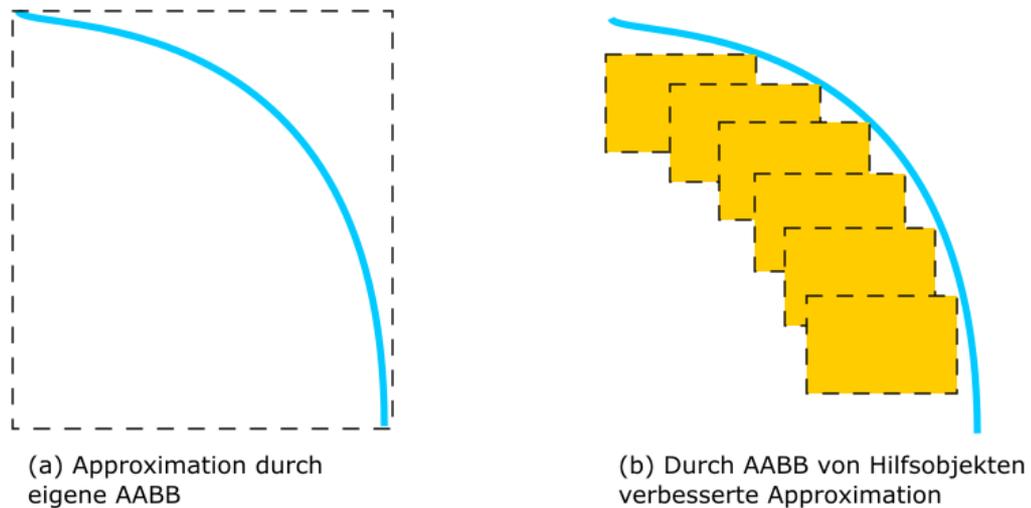


Abbildung 42: Schematische Darstellung einer Oberfläche (blau) durch die native AABB (a) und durch kombinierte AABB mehrerer Hilfsobjekte (b).

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Dekomposition der Fahrzeuginnenraumflächen (bspw. der Fahrertür) und die Platzierung der Hilfsobjekte wurden manuell durchgeführt. Die Genauigkeit der Approximation wurde qualitativ durch vier Pretester bewertet und für gut befunden.

Für die visuelle Darstellung der vibrotaktilen Armbänder wurden teiltransparente „Manschetten“ hinzugefügt (Abbildung 43). Es handelte sich dabei um zwei zylindrische Körper mit einem Durchmesser von 11cm und einer Höhe von 3cm.

Im letzten Schritt wurde die virtuelle Szene für eine möglichst latenzfreie und fotorealistische Darstellung optimiert. Hierzu wurde die Szenendatei um alle nicht versuchsrelevanten Informationen und nicht sichtbaren Fahrzeugbestandteile bereinigt. Im Versuch bestand die gesamte Szene (Fahrzeug- und Umgebungsmodell) aus circa 40 Millionen Polygonen.



Abbildung 43: Darstellung der virtuellen Manschetten als Repräsentation der VibroTac Armbänder und des Pointers. Die Abbildung zeigt eine Versuchsperson mit den Händen am Lenkrad. Quelle: Eigene Darstellung.

5.3.2.5 Operationalisierung der unabhängigen Variablen

Die unabhängige Variable *Display Fidelity des Kollisionsfeedbacks* (UV) wurde in drei Stufen variiert (Abbildung 33, S. 115). Während der Bewertung des Fahrzeuginnenraums stand den Teilnehmenden *visuelles* (VISU), *vibrotaktilen* (VIBRO) oder *kombiniertes* (KOMBI) Kollisionsfeedback zur Verfügung.

Visuelles Kollisionsfeedback

Das visuelle Kollisionsfeedback bestand darin, dass die virtuelle Repräsentation eines Interaktions-Devices (des Pointers oder der Armbänder) in eine Innenraumoberfläche „eintauchte“, sobald eine Benutzerin oder ein Benutzer diese berührte (Abbildung 44). Um den Zeitpunkt des Eintauchens festzustellen, muss permanenter Blickkontakt zum jeweiligen Interaktions-Device gehalten werden.

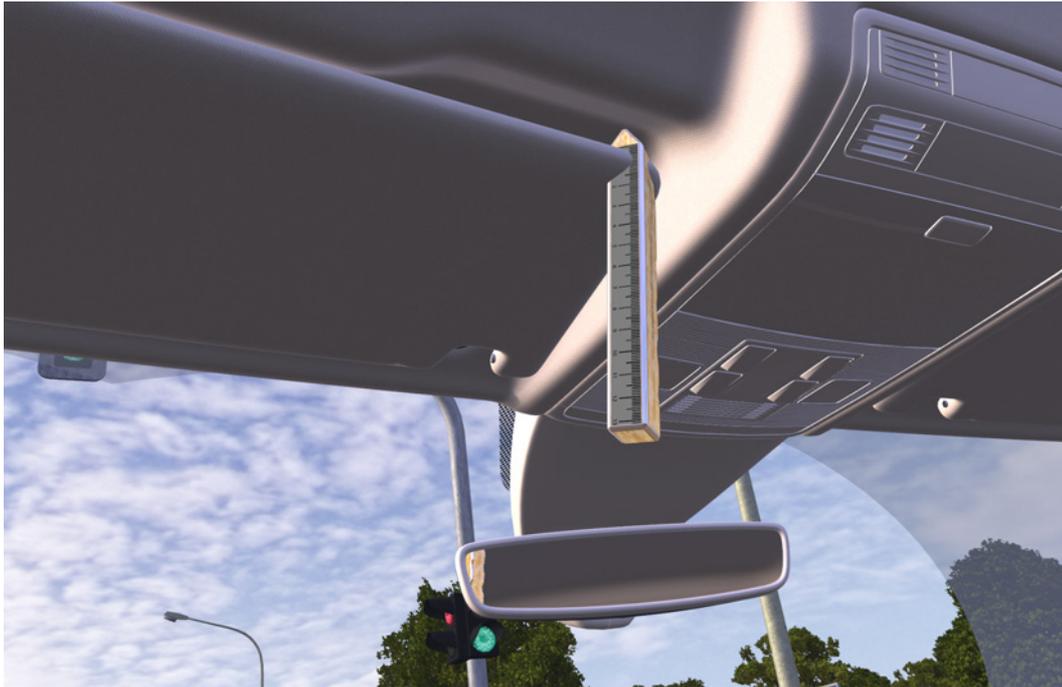


Abbildung 44: Eintauchen des Interaktions-Devices „Pointer“ in die Sonnenblende bei der Erreichbarkeitsprüfung der Eingriffsmulde der Sonnenblende.
Quelle: Eigene Darstellung.

Vibrotaktilen Kollisionsfeedback

Das vibrotaktile Kollisionsfeedback bestand darin, dass zwei an den Handgelenken getragene Armbänder immer dann vibrierten, wenn eines der Handgelenke der Nutzenden oder der Pointer den virtuellen Innenraum berührte. Im Gegensatz zum visuellen Feedback wurden die Armbänder dabei nicht visualisiert.

Kombiniertes Kollisionsfeedback

Das kombinierte Kollisionsfeedback vereinte die visuelle Darstellung der Interaktions-Devices mit der vibrotaktilen Rückmeldung der Armbänder.

5.3.3 Fragebogenkonstruktion und Operationalisierung der abhängigen Variablen

Als abhängige Variablen wurden die *Effizienz der Innenraumbewertung* (AV1a,b), die *empfundene Realitätsnähe der Innenraumdarstellung* (AV2), die *empfundene Nützlichkeit des Kollisionsfeedbacks für die Bewertung haptischer Eigenschaften* (AV3) und die auftretenden *Cybersickness-Symptome* (AV4) erhoben.

Zur Durchführung einer Fahrzeuginnenraumbeurteilung und zur Bewertung des Kollisionsfeedbacks durch die Teilnehmenden sowie zur Messung von Presence und Cybersickness wurde ein mehrteiliger Fragebogen entworfen. Im Folgenden wird die Fragebogenkonstruktion zwecks methodischer Transparenz detailliert beschrieben (5.3.3.1). Anschließend erfolgt eine Darstellung der operationalisierten Messgrößen (5.3.3.2).

5.3.3.1 Fragebogenkonstruktion

Im folgenden Abschnitt wird die Konstruktion der Fragebogenteile *Beurteilung des Fahrzeuginnenraums*, *Bewertung der Innenraumdarstellung*, *Cybersickness*, *Presence* und *Soziodemografie* im Detail erläutert.

Beurteilung des Fahrzeuginnenraums

Zur Bewertung des virtuellen Fahrzeuginnenraums durch die Teilnehmenden wurde ähnlich der vorhergehenden Studie (siehe Abschnitt 4.3.3.1) ein Fragebogen mit 54 Items und zwei Kontrollfragen entworfen.

Der Fragebogen wurde hinsichtlich des Aufbaus und der erwarteten Bearbeitungsdauer (gesteuert über die Anzahl der Fragen) äquivalent zu einem Innenraumabsicherungsfragebogen aus der Praxis aufgebaut. Im Gegensatz zu diesem wurden jedoch die Innenraum Aspekte in den Fokus gestellt, für deren Beurteilung der Einsatz von haptischem Feedback von Vorteil sein könnte.

Die Reihenfolge der Fragen wurde so gewählt, dass die bewertende Person sowohl auf der rechten als auch auf der linken Körperseite und sowie oberhalb als auch unterhalb der eigenen Brusthöhe bewertete. In der Praxis werden die Bewertungsaspekte hingegen überwiegend thematisch gruppiert und abgefragt. Auch die Entfernungen der zu bewertenden Elemente variierten zwischen nah (in Armreichweite) bis fern (Oberkörper musste zum Objekt hin bewegt werden).

Bewertung der Display Fidelity des Kollisionsfeedbacks

In diesem Fragebogenabschnitt sollten die Teilnehmenden die in ihrer Versuchsgruppe verwendete Innenraumdarstellung mithilfe von 35 Items bewerten. Das Ziel hierbei war es, die unterschiedlichen Ausprägungen des Kollisionsfeedbacks miteinander vergleichen zu können. Es wurde bspw. gefragt, wie gut es den Teilnehme-

rinnen und Teilnehmern möglich war, Erreichbarkeiten, Freigänge und Bewegungsfreiheit zu beurteilen, ob die Kollisionsrückmeldung auf eine intuitive oder nichtintuitive Art und Weise erfolgte und ob die Armbänder als schwer oder leicht empfunden wurden.

Zusätzlich zu den 35 Items mit Ratingskalen wurden vier Freitextkommentarfelder eingebaut, in denen die Teilnehmenden Angaben zum Realismusempfinden im virtuellen Fahrzeug, zu den VibroTac-Armbändern, zu Verbesserungsvorschlägen der Fahrzeugbeurteilung und zu auftretenden Störungen während des Versuchs machen konnten.

Cybersickness – Simulator-Sickness-Questionnaire

Beim verwendeten Fragebogen zur Erhebung von *Cybersickness* (siehe Abschnitt 2.1.4) handelte es sich um den, in der vorangegangenen Studie verwendeten Simulator-Sickness-Questionnaire (SSQ) von Kennedy et al. (1993). Der SSQ ist ein etabliertes Messinstrument zur Messung von *Simulator-* und auch *Cybersickness* (für eine Abgrenzung der beiden Begriffe siehe Kapitel 2.1.4). Verwendet wurde eine eigene Übersetzung ins Deutsche (Anhang B), die ursprünglich im Rahmen der Masterarbeit des Autors angefertigt wurde. Eine ausführliche Beschreibung zum Messinstrument ist im Abschnitt 4.3.3.1 der vorhergehenden Studie dargestellt.

Presence – Slater-Usoh-Steed-Questionnaire

Auch beim verwendeten Fragebogen zur Erhebung der *Presence* (siehe Abschnitt 2.1.2) handelt es sich um ein etabliertes Befragungsinstrument von Slater, Usoh & Steed (1994). Dieses wurde in unmodifizierter Form zur vorhergehenden Studie verwendet. Für die Verwendung innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde eine eigene Übersetzung ins Deutsche verwendet (Anhang A). Diese entstand ursprünglich im Rahmen der Masterarbeit des Autors. Die Formulierung der Items wurde für die Beurteilung eines Fahrzeugs angepasst. Eine ausführliche Beschreibung des Instruments kann Abschnitt 4.3.3.1 entnommen werden.

Soziodemografie

Der soziodemografische Fragebogenteil wurde ebenfalls aus der vorhergehenden Studie übernommen (siehe Abschnitt 4.3.3.1) und um die Abfrage hinsichtlich bekannter Einschränkungen der taktilen/haptischen Wahrnehmung ergänzt.

Die soziodemografischen Angaben wurden ausschließlich zur Stichprobenbeschreibung dieser Studie verwendet. Hierzu wurden sie ohne Personenbezug erfasst und in der Stichprobenbeschreibung so dargestellt, dass kein Rückschluss auf einzelne Teilnehmerinnen und Teilnehmer möglich war.

5.3.3.2 Operationalisierung der abhängigen Variablen

Der folgende Abschnitt beschreibt die Bildung von Indizes zur Operationalisierung der abhängigen Variablen *Effizienz der Innenraumbewertung* (AV1a,b), *Realitätsnähe* (AV2) und *Eignung des Feedbacks für die Bewertung haptischer Eigenschaften* (AV3).

Effizienz der Innenraumbewertung

Zur Überprüfung eines möglichen Einflusses des vibrotaktilen Feedbacks auf die *Effizienz der Innenraumbewertung* (H1) wurden zwei objektive Messgrößen ausgewertet. Es handelte sich zum einen um die *Anzahl der Kollisionen während der Innenraumbewertung* und zum anderen um die *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* (ohne Übungsaufgaben). Beide Messgrößen wurden während der Versuchsdurchführung vom VR-System automatisiert in einer Datei protokolliert.

Die *Anzahl der Kollisionen* (AV1a) während der Innenraumbewertung ist ein spezifisches Maß dafür, wie lange die Benutzerin oder der Benutzer Kontakt zum virtuellen Fahrzeuginnenraum hatte, um eine Bewertung der jeweiligen Fahrzeugeigenschaft vorzunehmen. Bei einem Kontakt (Kollision) eines der beiden VibroTac-Armbänder oder der Pointerspitze mit dem virtuellen Fahrzeuginnenraum schickte das System entsprechend der programmierten Logik einen Befehl zur Ansteuerung der Armbänder (5.3.2.3). Dieser Vorgang wurde mit einer Frequenz von 6 Hz solange wiederholt, bis der Kontakt des Benutzenden zum Innenraum gelöst wurde (keine Kollision mehr bestand). Die Anzahl der ausgelösten Kollisionen kann somit als Kontaktdauer zum virtuellen Fahrzeuginnenraum während der Bewertung ver-

standen werden und ermöglicht einen Vergleich der Bewertungseffizienz unabhängig von bspw. Orientierungsphasen oder dem verbalen Informationsaustausch zwischen Versuchsperson und -leiter.

Die *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* (AV1b) ist ein Indikator für die praktische Eignung der getesteten technischen Lösung. Sie erlaubt einen Rückschluss darüber, ob der Einsatz der technischen Lösung zu einer praxisrelevanten Veränderung der Effizienz führt. In der Praxis werden Innenraumbewertungen wie auch im Versuch von einer Vielzahl von Teilnehmern in einem definierten Zeitraum vorgenommen. Eine durchschnittliche Reduzierung der Bewertungsdauer von circa fünf Minuten hätte zur Folge, dass zwei bis drei Teilnehmer mehr an einem Bewertungstermin teilnehmen könnten.

Realitätsnähe der Innenraumdarstellung

Zur Untersuchung der Forschungshypothese bezüglich der Auswirkung von vibrotaktilen Feedback auf die *empfundene Realitätsnähe* (H2) der Darstellung wurde ein ungewichteter Index zur Erfassung der subjektiv *empfundene Realitätsnähe* (AV2) im virtuellen Fahrzeuginnenraum aus zehn Items (Anhang E.3) des zweiten Fragebogenteils (Abschnitt 5.3.3.1) gebildet. Die interne Konsistenz wurde mit Cronbachs $\alpha = .852$ bestimmt. Zur statistischen Auswertung wurden die Items umgepolt (siehe 5.3.7) und als arithmetischer Mittelwert verrechnet.

Bei der von den Teilnehmenden durchgeführten Innenraumbewertung kamen unterschiedliche Ausprägungen der Kollisionsrückmeldung zum Einsatz. Anschließend sollten sie einerseits angeben, ob der virtuelle Fahrzeuginnenraum und die Umgebung realistisch oder unrealistisch auf sie wirkten. Andererseits sollten sie angeben, inwiefern der dargestellte virtuelle Innenraum einem realen Fahrzeug bzw. einer Bewertung an einem realen Fahrzeug ähnelte.

Eignung für haptische Bewertung

Die *Eignung des Kollisionsfeedbacks für die Beurteilung von haptischen Eigenschaften* (H3) eines virtuellen Fahrzeuginnenraums wurde mithilfe eines Indexes (AV3) bestehend aus vier Items (Anhang E.4) untersucht. Hierbei wurden die Teilnehmenden gefragt, wie gut oder schlecht die Beurteilung von Erreichbarkeiten, der Auslegung von Armauflagen, Freigängen und der Bewegungsfreiheit im Innenraum

mit dem jeweiligen Kollisionsfeedback insgesamt möglich war. Die interne Konsistenz wurde mit Cronbachs $\alpha = .748$ als ausreichend hoch bestimmt. Die Mittelwerte der umgepolten Items (siehe 5.3.7) wurden als arithmetischer Mittelwert zusammengefasst.

5.3.4 Rekrutierung

Die Rekrutierung von Versuchspersonen erfolgte äquivalent zur vorangegangenen Studie über ein internes Access-Panel (siehe Abschnitt 4.3.4). Die Einladung zur Versuchsteilnahme wurde per E-Mail versandt und enthielt eine kurze Beschreibung sowie Dauer und Zeitraum des Versuchs. Über ein Buchungssystem hatten registrierte Personen bei Erhalt der Einladung die Möglichkeit, sich für die Teilnahme am Versuch anzumelden und sich in einen freien Versuchsslot einzutragen.

Wie in der vorangegangenen Studie wurde der einzuladende Personenkreis wie folgt eingegrenzt. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sollten in den Bereichen Forschung oder Entwicklung tätig und zwischen 30 und 50 Jahren alt sein. Der Anteil von weiblichen Teilnehmerinnen in der endgültigen Stichprobe sollte mindestens 30% betragen. Dieses grobe Personenprofil entspricht in etwa den regelmäßigen Nutzern des Systems und den Teilnehmern der Vorstudie (Abschnitt 3.3.5).

Die Beschreibung des Versuchs in der Einladungs-E-Mail lautete „Fahrzeuginnenraumbewertung in der virtuellen Realität“ und beschränkte sich lediglich auf allgemeine Informationen zum Zweck und Inhalt des Versuchs, um die Aufmerksamkeit der Teilnehmer nicht auf einzelne Untersuchungsaspekte zu fokussieren. Es wurde bewusst darauf verzichtet, das in der Untersuchung verwendete Fahrzeugmodell zu benennen, um eine Verzerrung der Stichprobe durch Teilnehmer mit Vorkenntnissen zum Fahrzeugprojekt zu vermeiden.

Als Aufwandsentschädigung (Incentive) erhielten die Teilnehmenden ein Sachgeschenk. Hierzu hatten sie die Möglichkeit, aus einer Auswahl von drei bis fünf Gegenständen zu wählen.

Unter den beschriebenen Randbedingungen wurde eine *nicht-zufällige, selbstselektive* Stichprobe rekrutiert.

5.3.5 Stichprobe

Während der Erhebungsphase nahmen insgesamt 89 Personen an der Untersuchung teil. In zwei Fällen wurde der Versuch aufgrund von technischen Störungen abgebrochen und die Daten aus der statistischen Auswertung ausgeschlossen.

Die endgültige Stichprobe umfasste $N = 87$ Teilnehmerinnen und Teilnehmer (31% Frauen, 69% Männer) im Alter zwischen 21 und 56 Jahren ($M = 37.17$, $SD = 8.06$).

42 (48%) der Teilnehmerinnen und Teilnehmer gaben an, beim Autofahren eine Brille oder Kontaktlinsen zu tragen und 21 (24%) verwenden eine Lesebrille. Keine Teilnehmerin oder Teilnehmer gab an, an einer eingeschränkten Farbwahrnehmung oder eingeschränkter taktilen/haptischen Wahrnehmung zu leiden. Hierzu wurden die Versuchspersonen gefragt: „Sind Ihnen Einschränkungen Ihrer Farbwahrnehmung bekannt (z. B. Rot-Grün-Sehschwäche)?“ sowie „Sind Ihnen Einschränkungen Ihrer taktilen/haptischen Wahrnehmung bekannt?“

Die Stichprobe enthielt Teilnehmende mit Vorerfahrungen in den Bereichen: Virtual Reality $n = 18$ (21%); Virtuelle Sitzkisten $n = 22$ (25%); Virtuelle Fahrzeugabsicherung $n = 5$ (6%). Weitere Stichprobenmerkmale können Tabelle 10 entnommen werden.

Eine Randomisierung der Untersuchungspersonen auf die Versuchsgruppen war aufgrund von technischen Gegebenheiten der Versuchsapparatur nicht möglich. Es wurde daher angestrebt, die Versuchsgruppen hinsichtlich einiger personengebundenen Störvariablen (Geschlecht, Körpergröße, Alter) zu parallelisieren (Döring & Bortz, 2016, S. 200). Ebenso wurde versucht, die Ausprägungen der Kollisionsrückmeldung (*visuell*, *haptisch*, *kombiniert*) gleichmäßig auf Vor- und Nachmittagslots zu verteilen, um Störeinflüsse wie bspw. Müdigkeit auszubalancieren.

Tabelle 10

Übersicht der Merkmalshäufigkeiten innerhalb der Stichprobe (N = 87)

Merkmal	<i>n</i>	%
Geschlecht		
männlich	60	69
weiblich	27	31
Alter zum Befragungszeitpunkt (in Jahren)		
< 26	3	3
26–30	17	20
31–35	22	25
36–40	12	14
41–45	13	15
46–50	19	22
51–55	0	0
55 >	1	1
Körpergröße (in Zentimetern)		
< 160	1	1
160–169	15	17
170–179	24	28
180–189	37	43
190–199	9	10
199 >	1	1
Höchster Bildungsabschluss		
Ohne Schulabschluss	0	0
Schulabschluss (z. B. Haupt-, Real-, Gymnasialabschluss)	2	2
Abgeschlossene Berufsausbildung (nach Lehre oder Berufsfachschule)	10	11
Techniker(-in), Meister(-in), Fachwirt(-in)	11	13
Hochschulabschluss	64	74
Nicht angegeben	0	0
Verwenden einer Sehhilfe		
Lesebrille	21	24
Brille (während der Autofahrt)	36	41
Gleitsichtbrille (während der Autofahrt)	5	6
Kontaktlinsen (während der Autofahrt)	12	14
Vorerfahrungen		
3D-Spiele, 3D-Filme	49	56
Virtual Reality	18	21
Augmented Reality	13	15
Computersimulation	35	40
CAD, DMU, Konstruktion	41	47
Sitzkisten	39	45
Virtuellen Sitzkisten	22	25
Beurteilung von Prototypen oder Konzeptfahrzeugen	23	26
Virtuelle Fahrzeugabsicherung	5	6
Vorerfahrungen mit dargestelltem Fahrzeugmodell (oder Vorgängermodell)		
im privaten Bereich	3	3
beruflich	8	9
privat und beruflich	1	1

Anmerkung. Aufgrund von Rundungen können sich bei prozentualen Angaben geringfügige Abweichungen ergeben.

5.3.6 Untersuchungsdurchführung

Zur Sicherstellung der Transparenz und Replizierbarkeit der vorliegenden Studie im Sinne der Wissenschaftlichkeit (Döring & Bortz, 2016, S. 104 ff.) folgt eine detaillierte Schilderung der Untersuchungsabläufe. Die Untersuchungsabschnitte können Abbildung 45 entnommen werden.

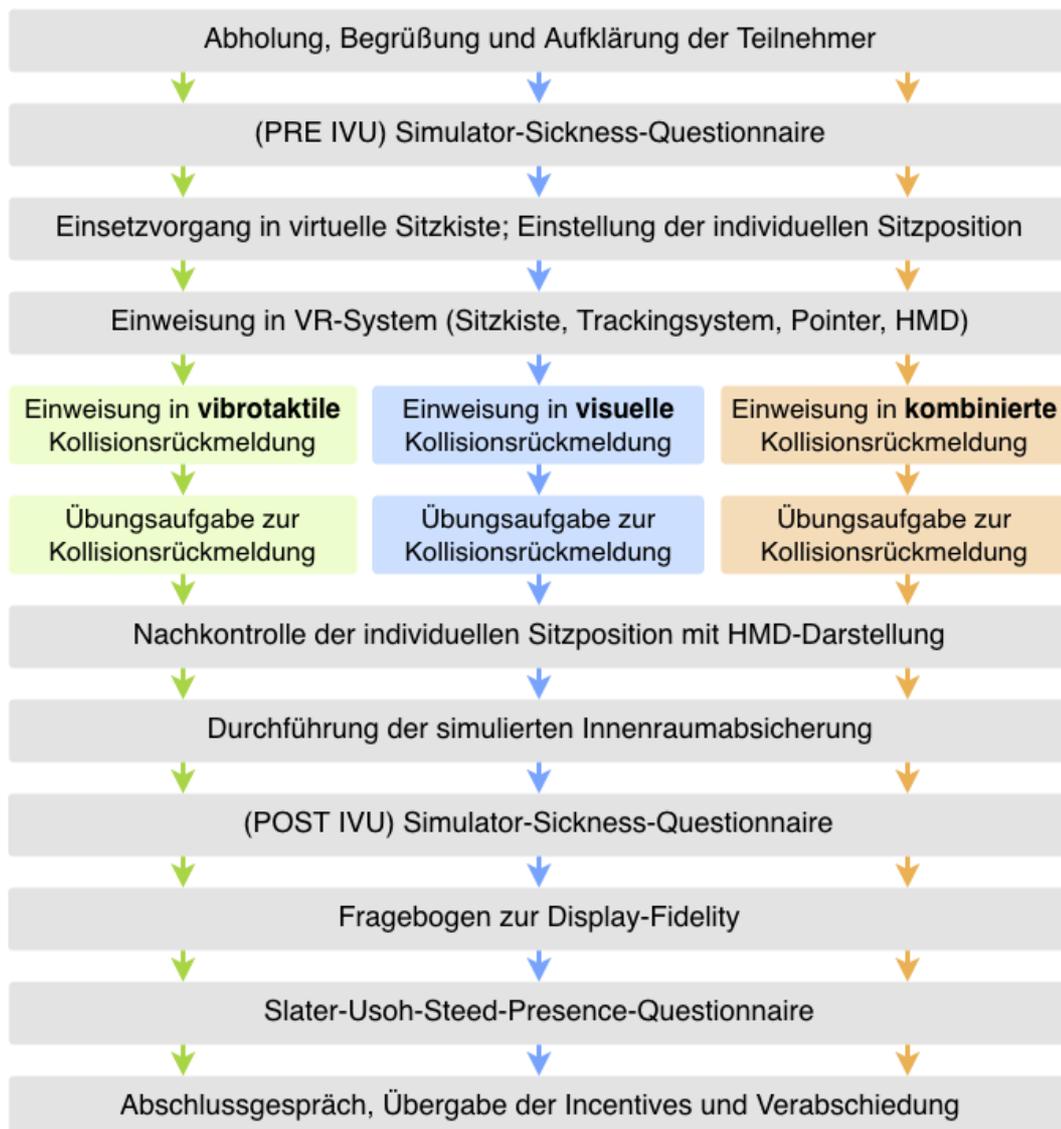


Abbildung 45: Schematischer Ablauf der Versuchsdurchführung für die Gruppen mit vibrotaktile (grün), visueller (blau) und kombinierter (orange) Kollisionsrückmeldung. Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Steigerung der ökologischen Validität (Döring & Bortz, 2016, S. 106) wurden die Untersuchungsbedingungen so gewählt, dass sie denen einer in der Praxis durchgeführten Beurteilung möglichst nahe kommen. Hierzu wurden der gleiche

Raum und die gleiche Apparatur (mit Ausnahme der vibrotaktilen Feedback-Devices) verwendet. Die Struktur und Dauer (bezogen auf die Zeit in der IVU) der Bewertung wurde äquivalent zur Praxisbeurteilung gewählt. Die Fragen des Fahrzeugbewertungsbogens wurden den Teilnehmenden durch den Versuchsleiter vorgelesen und deren Bewertungsergebnisse ebenso vom Versuchsleiter auf dem Bogen notiert, da die Teilnehmer durch das Tragen des HMDs den Fragebogen nicht selbst ausfüllen konnten. Auch das Ansteuern verschiedener 3D-Animationen (bspw. Ausklappen der virtuellen Sonnenblende bei der Sichtbeurteilung) wurde vom Versuchsleiter vorgenommen. Abweichend zur Beurteilung in der Praxis wurde die Auswahl der zu bewertenden Innenraumeigenschaften stark, jedoch nicht ausschließlich, auf haptisch erlebbare Eigenschaften fokussiert. Weiterhin befanden sich außer dem Versuchsleiter und der jeweiligen Versuchsperson keine weiteren Personen im Raum und es wurden keine realen Vergleichsfahrzeuge aufgestellt. Die Durchführung der Untersuchung erfolgte über die Dauer von drei Wochen im Januar 2016 in der technischen Entwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg. Die Untersuchung wurde im Einzelversuch durchgeführt. Die mittlere Dauer der Innenraumbeurteilung sowie der Gesamtdauer der Untersuchung sind Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11

Dauer der Innenraumbeurteilung sowie der Untersuchungsdurchführung pro Versuchsgruppe (N = 87)

Dauer (in Minuten)	Versuchsgruppe					
	visuell <i>n</i> = 29		vibrotaktil <i>n</i> = 29		kombiniert <i>n</i> = 29	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Innenraumbeurteilung in VR	9:53	4:38	14:04	6:03	9:33	3:46
Untersuchungsdurchführung	29:50	7:35	31:32	7:55	30:25	5:36

5.3.6.1 Begrüßung und Einweisung

Die Versuchspersonen wurden einzeln an einem zentralen Treffpunkt vom Versuchsleiter abgeholt und in die nahegelegenen Versuchsräume gebracht. Dort wurden sie gebeten, an einem Schreibtisch Platz zu nehmen. Von diesem aus war der Versuchsaufbau für die Teilnehmer nicht sichtbar.

Die Versuchspersonen wurden zunächst mündlich standardisiert über die Rahmenbedingungen (Inhalt, Ablauf und Dauer) der Untersuchung aufgeklärt. Hierzu verlas der Versuchsleiter standardisierte Instruktionen (Anhang E.1). Zur Sicherung der Forschungsethik (Döring & Bortz, 2016, S. 124 ff.) wurden die Teilnehmenden über ihre Rechte aufgeklärt und gaben im Anschluss mündlich eine informierte Einwilligung in die Untersuchungsteilnahme.

Sie wurden darüber informiert, dass sie als freiwillige Teilnehmer jederzeit und ohne persönliche Konsequenzen die Möglichkeit hätten, die Untersuchung zu pausieren oder abzubrechen sowie auch einzelne Fragen auszulassen. Ebenso wurden sie darüber informiert, dass die Daten anonym erhoben und die Ergebnisse so zusammengefasst werden, dass kein Rückschluss auf den Einzelnen mehr möglich sei. Im Anschluss bestand die Möglichkeit, Fragen zum Ablauf zu stellen.

Die Versuchspersonen wurden darauf hingewiesen, Mobiltelefone während der Versuchsdurchführung aus- oder stumm zu schalten und nicht am Körper zu tragen. Zusätzlich wurden die Untersuchungspersonen gebeten, Armbänder und Armbanduhren für die Dauer der Bewertung abzulegen, um die spätere Bewertung der vibrotaktilen Feedback-Devices hinsichtlich des Gewichts, des Tragekomforts etc. nicht zu verfälschen.

Den Versuchspersonen wurde im Vorfeld (in der Einladung sowie bei Nachfragen) mitgeteilt, dass sie eine Bewertung von Innenraumaspekten eines sich in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugs in einer *virtuellen Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) durchführen sollten. Bei weiterführenden Fragen zum Hintergrund der Untersuchung wurden die Versuchspersonen gebeten, diese nach dem Versuchsdurchlauf nochmals zu stellen, um Verzerrungen in den Daten durch Beeinflussung, selektive Wahrnehmung etc. zu vermeiden. Im Anschluss an die Einweisung füllten die Teilnehmer einen Befindlichkeitsfragebogen (Abschnitt 5.3.3.1) aus.

5.3.6.2 Ausrüstung und Einweisung der Teilnehmer in das VR-System

Im Anschluss an den vorbereitenden Teil wurde die Versuchsperson zur *virtuellen Sitzkiste* geführt und standardisiert auf die Innenraumbewertung vorbereitet (für Instruktionen siehe Anhang E.2). Zunächst sollte die Teilnehmerin oder der Teilnehmer auf dem Fahrzeugsitz Platz nehmen und – zuerst ohne virtuelle Darstellung – eine bequeme Sitzposition finden und einstellen, bei der die Pedale und das Lenkrad gut erreichbar waren. Anschließend wurde die Funktionsweise der zum VR-System und zur Versuchsdurchführung gehörenden Geräte Pointer, VibroTac und HMD erklärt und die Untersuchungsperson damit ausgerüstet. Es folgte eine Erläuterung der Funktionsweise der visuellen (VISU), vibrotaktilen (VIBRO) oder kombinierten (KOMBI) Kollisionsrückmeldung, die sich abhängig der Versuchsgruppe wie folgt unterschied:

Einweisung in Kollisionsrückmeldung der Gruppen VISU und KOMBI

In den Gruppen VISU und KOMBI wurden virtuelle „Manschetten“ und der Pointer als visuelle Kollisionsrückmeldung eingeblendet (siehe Abbildung 43, auf Seite 125). Die Position der Manschetten wurde vom Trackingsystem anhand der Tracking-Targets der VibroTac-Armbänder bestimmt. Zur Demonstration der visuellen Kollisionsrückmeldung wurde das Handgelenk der Untersuchungsperson vom Versuchsleiter an die virtuelle A-Säule des Fahrzeugs geführt, bis die halbtransparenten Manschetten in die Säule eintauchten und die Überschneidung der beiden Geometrien sichtbar wurde. Gleiches wurde mit der Spitze des Pointers demonstriert und erklärt, dass das Eintauchen der Spitze in eine andere virtuelle Innenraumbooberfläche, dem Berühren mit der Spitze des Zeigefingers entsprechen würde.

Einweisung in Kollisionsrückmeldung der Gruppen VIBRO und KOMBI

In den Gruppen VIBRO und KOMBI gab es vibrotaktilen Feedback bei Kollisionen mit dem virtuellen Fahrzeuginnenraum. Zur Demonstration des vibrotaktilen Kollisionsfeedbacks wurde das linke Handgelenk der Untersuchungsperson durch den Versuchsleiter an die virtuelle Fahrertür herangeführt, bis die Kollision durch Vibrationen signalisiert wurde. Durch eine Drehung des Handgelenks (Verschiebung des kollidierenden Bereichs) wurde den Nutzenden zusätzlich vorgeführt, dass eine Kollision an der Stelle des Handgelenks

(richtungsabhängig) signalisiert wird, an der das Handgelenk das virtuelle Fahrzeug berührt. Dies erfolgte durch eine gezielte Ansteuerung einzelner Vibrationsmotoren (siehe Abschnitt 5.3.3.2). Gleichzeitig wurde die Demonstration vom Versuchsleiter dazu genutzt, vor jedem Versuchsdurchlauf zu überprüfen, ob die Ansteuerung der Armbänder sowie die Kollisionserkennung einwandfrei funktionierten. Des Weiteren wurde demonstriert, dass eine Kollision der Pointerspitze mit dem Fahrzeuginnenraum jeweils an dem VibroTac signalisiert wird, der zu der Hand gehört, die den Pointer umfasst. Dabei wurden (richtungsunabhängig) alle Vibrationsmotoren angesteuert.

Den Teilnehmerinnen und Teilnehmern aller Gruppen wurde abschließend der Hinweis gegeben, dass die Armbänder eine Referenz der eigenen Handgelenke und der Pointer die Repräsentation des eigenen Zeigefingers darstellen. Der Pointer blieb in allen drei Versuchsgruppen sichtbar, da ansonsten aufgrund der nicht vorhandenen Körperdarstellung eine intuitive Orientierung nicht gegeben wäre.

Im letzten Schritt wurde die Untersuchungsperson dabei unterstützt, das HMD aufzusetzen und die Verstellung der Kopffixierung optimal einzustellen. In einigen Fällen ($n = 5$, 6%) war der minimal einstellbare Kopfumfang des HMDs nicht ausreichend, um das Display bequem und sicher am Kopf zu fixieren. Diesem Problem wurde mit Polsterung des Kopfes mittels Papiertüchern begegnet.

Über das HMD vermittelt sahen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer nun eine immersive Darstellung des virtuellen Fahrzeugs, das an einer Straßenkreuzung positioniert wurde (siehe Abbildung 43, auf Seite 125). Die Untersuchungsperson wurde nun gebeten, ihre individuelle Sitzeinstellung nochmals zu kontrollieren und ggf. anhand der eigenen Sichtverhältnisse so anzupassen, dass es prinzipiell möglich wäre, mit dem Fahrzeug loszufahren.

Generell ist die korrekte individuelle Sitzeinstellung essentiell für den Bewertungsvorgang. Ein nicht korrekt auf die Person eingestellter Sitz versetzt die Person in der virtuellen Umgebung auf eine falsche (virtuelle) Sitzposition, was aufgrund der fehlenden Körperdarstellung unbemerkt bleiben kann. Als Folge könnten bspw. die Ergebnisse von Erreichbarkeitsbewertungen systematisch verzerrt werden, da Entfernungen sich von denen einer realen Sitzposition unterscheiden. Im Praxisbetrieb der *virtuellen Sitzkiste* konnte häufig beobachtet werden, dass Benutzerinnen und

Benutzer die Sitzeinstellmöglichkeit nicht intuitiv nutzen, wenn sie nicht explizit dazu aufgefordert wurden (siehe auch Abschnitt 3.4.5).

Insbesondere bei der Sitzeinstellung unter Verwendung eines HMDs liefern S. Lorenz et al. (2008) Hinweise darauf, dass je nachdem, ob Nutzende das HMD vor oder nach der individuellen Sitzeinstellung aufsetzen sowie in Abhängigkeit einer Vorpositionierung des Sitzes durch anthropometrische Maße, Abweichungen zum äquivalenten Realfahrzeug entstehen können. Die von S. Lorenz et al. (2008) dargestellten Mittelwerte deuten anhand der hohen Standardabweichungen auf mögliche Ausreißer in der Stichprobe und bewegen sich in Wertebereichen, die als intraindividuelle Differenzen betrachtet werden könnten (Lorenz, 2013, S. 8).

5.3.6.3 Durchführung der Übungsaufgaben zur Kollisionsrückmeldung

Nach erfolgter Kontrolle der Sitzposition durch die Untersuchungspersonen wurden sie dazu aufgefordert, zwei Übungen durchzuführen, um die Funktionsweise des jeweiligen Kollisionsfeedbacks eigenständig zu erfahren. Als erste Übung sollten die Teilnehmenden den Pointer in der rechten Hand haltend, den virtuellen Innenspiegel berühren. In den Gruppen VIBRO und KOMBI vibrierte daraufhin das rechte vibrotaktile Armband. In den Gruppen VISU und KOMBI konnte beobachtet werden, wie die virtuelle Pointerspitze in den Innenspiegel eintauchte.

In einer zweiten Übung sollten die Versuchspersonen ihren linken Arm (ohne Pointer) auf der Armablage der linken Tür ablegen. In den Gruppen VIBRO und KOMBI vibrierte daraufhin das linke vibrotaktile Armband. Die Gruppen VISU und KOMBI sahen dabei, wie die virtuelle Manschette in die Armauflage eintauchte (Abbildung 46).

Abschließend wurden die Teilnehmenden gefragt, ob ihnen die grundsätzliche Funktionsweise der jeweiligen Kollisionsrückmeldung klargeworden sei, und offene Fragen beantwortet.



Abbildung 46: Visuelle Kollisionsrückmeldung beim Eintauchen der virtuellen Manschetten in die Armauflage. Quelle: Eigene Darstellung.



(a) Keine Visualisierung der VibroTacs

(b) Transparente Visualisierung der VibroTacs

Abbildung 47: Gegenüberstellung der Erreichbarkeitsbewertung von Medienanschlüssen ohne (a) und mit Visualisierung (b) der vibrotaktilen Armbänder. Quelle: Eigene Darstellung.

5.3.6.4 Simulierte Innenraumabsicherung

Im Anschluss an die Übungsaufgaben folgte die simulierte Innenraumabsicherung. Dabei beurteilten die Teilnehmer den Innenraum anhand von insgesamt 53 Items. Die Reihenfolge der Bewertungspunkte wurde so konstruiert, dass die Untersu-

chungspersonen sich zunächst einen visuellen Überblick über den Innenraum verschaffen konnten und Zeit bekamen, sich an die Darstellung des HMDs zu gewöhnen. Dazu wurden zunächst einige wenige Aufgaben mit Kollisionsrückmeldungen, Bewertungen von Sichtverdeckungen und Übersichtlichkeit des Innenraums durchgeführt.

Es folgte ein Block von Erreichbarkeitsbewertungen. Die zu bewertenden Innenraumelemente wurden für die Untersuchung so gewählt, dass deren Bewertung abwechselnd links, rechts, oberhalb und unterhalb der Körpermitte zu erfolgen hatte, um möglichst verschiedene Kollisionssituationen herbeizuführen. Weiterhin befanden sich die Elemente sowohl relativ nah als auch fern der Versuchsperson und lagen wechselnd im frontalen und peripheren Sichtbereich. Die durchschnittliche Dauer der Bewertung kann Tabelle 12 entnommen werden.

Nach Abschluss der Innenraumbewertung wurden die Versuchsdauern protokolliert und die Untersuchungsperson in umgekehrter Reihenfolge abgerüstet.

5.3.6.5 Post VR-Befragungsblock

Unmittelbar nach der simulierten Innenraumbewertung wurden die Teilnehmer von der *virtuellen Sitzkiste* zurück zum Schreibtisch gebracht und bearbeiteten erneut einen Befindlichkeitsfragebogen. Ziel der zweiten Erhebung war es, die durch die IVU verursachten Symptome zu erfassen. Hierbei bestand auch die Gelegenheit, sich nach dem Versuch zu regenerieren und bei bestehendem Unwohlsein eine Erfrischung zu sich zu nehmen.

Die Versuchspersonen wurden nun gebeten zu bewerten, wie gut es ihnen möglich war, mithilfe der eingesetzten VR-Technik die Bewertung des Innenraums vorzunehmen.

Im letzten Schritt bearbeiteten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer den SUS-Fragebogen zur Erhebung der Presence (Anhang A).

Sobald eine Teilnehmerin oder Teilnehmer signalisierte, einen Befragungsteil abgeschlossen zu haben, wurde die Bearbeitungszeit auf dem Versuchsprotokoll notiert.

5.3.6.6 Abschlussgespräch, Incentive-Übergabe, Verabschiedung

Im Abschlussgespräch gab es für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Gelegenheit, Fragen zur Untersuchung oder zum Fahrzeugprojekt zu stellen. Anschließend kontrollierte der Versuchsleiter die Vollständigkeit der Fragebögen und die Lesbarkeit der Freitextkommentare und stellte ggf. Rückfragen.

Im Rahmen der Verabschiedung erfolgte die Auswahl und Übergabe der vom Probandenpool (Abschnitt 4.3.4) zur Verfügung gestellten Incentives. Der Versuchsleiter bedankte sich abschließend für die Teilnahme und verabschiedete sich von den Versuchspersonen.

5.3.7 Datenanalyse

Aufgrund der äquivalenten Datenerhebung zur vorangegangenen Studie erfolgte die Datenanalyse nach der dort angewandten Struktur (siehe 4.3.7). Aus diesem Grund erfolgen an dieser Stelle lediglich eine kurze Zusammenfassung sowie der Verweis auf Abschnitt 4.3.7.

Die Übertragung der mithilfe von Papierfragebögen erhobenen Daten und deren Bereinigung erfolgte manuell mithilfe von Microsoft Excel 2010.

Zur statistischen Auswertung kam das Softwarepaket *IBM SPSS Statistics 22* zum Einsatz. Hierbei konnten einige aus der vorangegangenen Studie vorhandene Auswertungsskripte (bspw. zur Berechnung der Presence- und Simulator-Sickness-Skalen) wiederverwendet werden.

Der Wertebereich der sechsstufig skalierten Items (1–6) wurde so transformiert, dass eine hohe Zustimmung einem hohen Wert (5) entsprach und die geringste Zustimmung einer Null.

Auch in dieser Studie wurde die Anonymisierung der Daten bereits im Zuge der Datenerhebung sichergestellt. Hierzu wurden fortlaufende Probandennummern statt Namen verwendet sowie keine seltenen soziodemografischen Merkmale erhoben oder zur Stichprobenbeschreibung verwendet.

5.4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der statistischen Signifikanztests zur Überprüfung der *Effizienz der Aufgabenerfüllung nach Art des Kollisionsfeedbacks* (5.4.1), der *empfundene Realitätsnähe nach Art des Kollisionsfeedbacks* (5.4.2) sowie die *Eignung der verschiedenen Methoden des Kollisionsfeedbacks für Bewertungen haptischer Eigenschaften* (5.4.3) beschrieben. Weiterhin erfolgt die Darstellung der Nebenbefunde: aufgetretene *Cybersickness*-Symptome (5.4.4) und die im virtuellen Prototyp erlebte *Presence* (2.1.2).

5.4.1 Effizienz der Aufgabenerfüllung nach Art des Kollisionsfeedbacks

Die Überprüfung der Hypothese, dass die *Effizienz der Beurteilung* von haptischen Eigenschaften im virtuellen Fahrzeuginnenraum mit vibrotaktilen Feedback höher ist als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung (H1), wurde mithilfe der *Anzahl von Kollisionen während der Innenraumbewertung* (AV1a) sowie der *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* (AV1b) überprüft.

In der Stichprobe ($N = 86$) zeigte sich ein Rückgang der *Anzahl von Kollisionen während der Innenraumbewertung* (AV1a) mit steigender *Display Fidelity* (Tabelle 12). Die Anzahl von Kollisionen zum Innenraum war ein Maß dafür, wie lange die Benutzenden Kontakt zum virtuellen Fahrzeuginnenraum aufrecht erhielten, um eine Bewertung der jeweiligen Fahrzeugeigenschaft vorzunehmen (siehe Operationalisierung in Abschnitt 5.3.3.2).

Die Gruppe mit visuellem Kollisionsfeedback löste die meisten Kollisionen aus. Demgegenüber löste die Gruppe mit vibrotaktilen Feedback nahezu ein Drittel weniger Kollisionen aus. Bei kombinierter Kollisionsrückmeldung wurde die geringste Anzahl an Kollisionen ausgelöst. Eine Varianzanalyse mit einem Post-hoc-Mehrfachvergleich bestätigte einen signifikanten Unterschied großer Effektstärke ($F_{(2,83)} = 12.44, p < .001 \eta^2 = .230$).

Die Gesamtdauer der Innenraumbewertung (AV1b) unterschied sich in der Stichprobe nur unwesentlich zwischen den Gruppen mit visuellem und kombiniertem Kollisionsfeedback mit durchschnittlich circa 40 Sekunden, während die Gruppe mit vibrotaktilen Feedback im Durchschnitt circa vier Minuten länger für eine Be-

wertung benötigte. Auch hier zeigte die Varianzanalyse mit einem Post-hoc-Mehrfachvergleich einen signifikanten Unterschied großer Effektstärke ($F_{(2,83)} = 7.57, p < .001, \eta^2 = .154$).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Untersuchung beider abhängigen Variablen zu keinem eindeutigen Ergebnis im Sinne der Effizienzsteigerung durch vibrotaktilen Feedback (H1) kommt. Während die *Anzahl von Kollisionen während einer Innenraumbewertung* (AV1a) hypothesenkonform abnahm, zeigte sich hypothesenkonträr eine Zunahme der *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* (AV1b). Hierbei führte der Einsatz von vibrotaktilem Feedback zu einer signifikanten Zunahme der Gesamtdauer gegenüber den übrigen Versuchsbedingungen.

Tabelle 12

Effizienz der Aufgabenerfüllung nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 86)

Kennzahl	Kollisionsfeedback					
	visuell <i>n</i> = 28		vibrotaktil <i>n</i> = 29		kombiniert <i>n</i> = 29	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
AV1a: Kollisionen während der Innenraumbewertung ^a	1551 _a	936	1092 _b	746	613 _c	307
Berechnete Kontaktdauer zum Innenraum (min)	4:19	1:46	3:02	2:04	1:42	0:51
AV1b: Bewertungsdauer (min) ^b	9:53 _a	4:38	14:04 _b	6:03	9:33 _a	3:46

Anmerkung. Mittelwerte derselben Zeile mit unterschiedlichen Kennbuchstaben (a, b, c) unterscheiden sich signifikant voneinander ($p < .05$).

^aRyan-Einot-Gabriel-Welsch-Test. ^bKruskal-Wallis-Test.

Zur weiterführenden Interpretation des nicht eindeutigen Ergebnisses und zur Vereinfachung der Gegenüberstellung beider abhängiger Variablen wurde anhand der Anzahl ausgelöster Kollisionen (AV1a) die anteilige Dauer der Beurteilungstätigkeit bestimmt, in der die Versuchsperson Kontakt zum virtuellen Fahrzeuginnenraum aufrechterhielt. Dabei handelt es sich um kumulierte Zeitspannen, in denen

eine Versuchsperson den Kontakt zum Innenraum herstellte (bspw. der Arm erreicht eine virtuelle Armauflage), dies für sich feststellte (je nach Gruppe visuell, vibrotaktil oder kombiniert), sich ein Urteil über das zu bewertende Innenraumelement bildete und den Kontakt anschließend wieder löste, indem sie zum Beispiel eine neutrale Sitzposition einnahm. Die Berechnung der Kontaktdauer aus der Gesamtanzahl der Kollisionen einer Versuchsperson erfolgte auf Basis der systemseitigen Erfassungsfrequenz von 6 Hz.

Die Gegenüberstellung in Abbildung 48 zeigt, dass die Versuchsgruppe mit vibrotaktilen Feedback lediglich circa 70% (3:02 min) der durchschnittlichen Kontaktzeit gegenüber der Gruppe mit visueller Kollisionsrückmeldung (4:19 min) benötigte. Die Gruppe mit kombiniertem Kollisionsfeedback (vibrotaktil und visuell) benötigte darüber hinaus lediglich circa 40% (1:42 min) der Kontaktzeit gegenüber der Gruppe mit visueller Kollisionsrückmeldung.

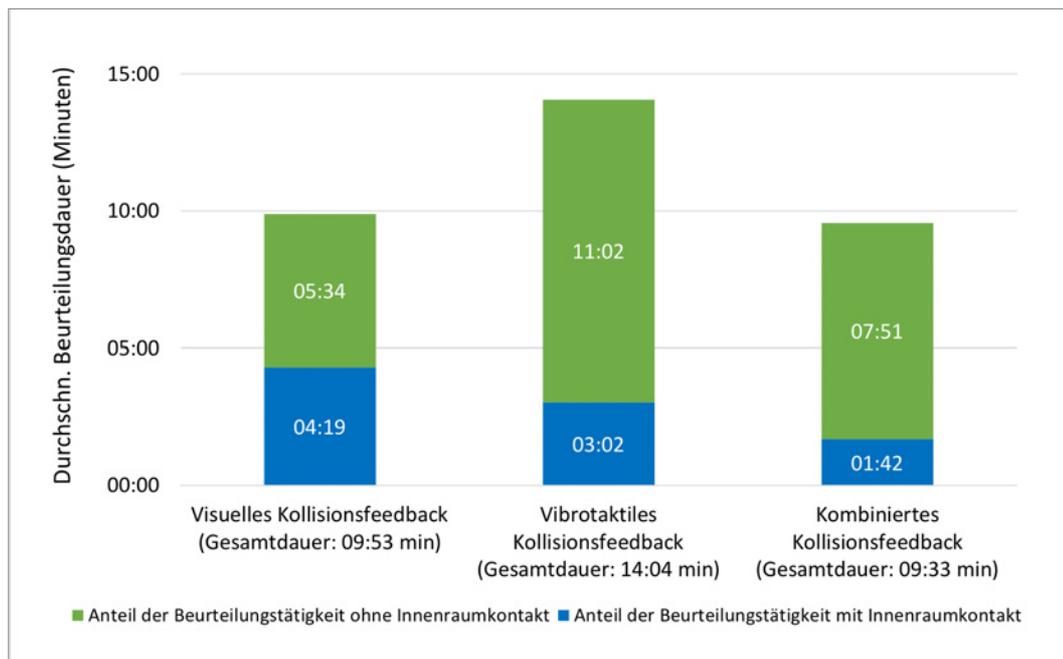


Abbildung 48: Zusammensetzung der durchschnittlichen Gesamtdauer der Innenraumbeurteilung pro Versuchsgruppe (in Minuten), nach Anteilen mit (blau) und ohne (grün) Innenraumkontakt. Quelle: Eigene Darstellung.

5.4.2 Empfundene Realitätsnähe nach Art des Kollisionsfeedbacks

Der Einfluss der *Display Fidelity* des Kollisionsfeedbacks auf die *empfundene Realitätsnähe* des virtuellen Fahrzeugs (H2) wurde mithilfe eines Indexes *Realitätsnähe* (AV2) überprüft.

In der Stichprobe ($N = 87$) empfand die Gruppe mit vibrotaktilen Feedback die höchste Realitätsnähe, die Gruppe mit kombiniertem Feedback die zweithöchste und die Gruppe mit visuellem Feedback die geringste Realitätsnähe (Tabelle 13).

Demnach empfanden beide Versuchsgruppen mit vibrotaktilem Kollisionsrückmeldung eine hypothesenkonforme Erhöhung der empfundenen Realitätsnähe gegenüber der Gruppe mit rein visueller Kollisionsrückmeldung.

Eine Varianzanalyse mit einem Post-hoc-Mehrfachvergleich zeigte jedoch keinen signifikanten Gruppenunterschied ($F_{(2,84)} = 1.31, p = .275, n.s.$).

Tabelle 13

Empfundene Realitätsnähe nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 87)

Index	Kollisionsfeedback					
	visuell <i>n</i> = 29		vibrotaktil <i>n</i> = 29		kombiniert <i>n</i> = 29	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Empfundene Realitätsnähe ^a	3.62	0.70	3.90	0.67	3.76	0.54

Anmerkung. ^aWertebereich: 0–5.

5.4.3 Eignung der verschiedenen Methoden des Kollisionsfeedbacks für Bewertung haptischer Eigenschaften

Die Überprüfung der Hypothese, dass die *empfundene Eignung* des vibrotaktilen Feedbacks bei der Beurteilung der virtuellen Fahrzeuginnenraumdarstellung höher ist als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung (H3), wurde mithilfe des Indexes *Eignung für haptische Bewertung* (AV3) durchgeführt.

In der Stichprobe ($N = 87$) wurde die Eignung in der Gruppe mit kombiniertem Kollisionsfeedback am höchsten bewertet. Der Wert in der Gruppe mit visuellem

Feedback lag minimal über dem der Gruppe mit vibrotaktilen Feedback. Hierbei lagen alle drei Gruppenwerte sehr dicht beieinander (Tabelle 14).

Eine Varianzanalyse mit einem Post-hoc-Mehrfachvergleich zeigte keinen signifikanten Unterschied ($F_{(2,84)} = 0.18, p = .838, n.s.$) zwischen den drei Versuchsgruppen.

Tabelle 14

Eignung für haptische Bewertung nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 87)

Index	Kollisionsfeedback					
	visuell <i>n</i> = 29		vibrotaktil <i>n</i> = 29		kombiniert <i>n</i> = 29	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Eignung für haptische Bewertung ^a	3.44	0.95	3.41	0.83	3.53	0.79

Anmerkung. ^aWertebereich: 0–5.

5.4.4 Nebenbefund: Nach virtueller Innenraumbeurteilung gemessene Cybersickness

Wie bei der vorangegangenen Studie (siehe Abschnitt 4.4.4) wurden auch während dieses Versuchs Cybersickness-Symptome in einer Vorher-Nachher-Messung mithilfe des *Simulator-Sickness-Questionnaire* (SSQ) erhoben.

Die Betrachtung der Stichprobendaten ($N = 87$) zeigte einen Anstieg der vor der virtuellen Beurteilung erhobenen Symptomausprägungen ($M = 8.65, SD = 10.30$) gegenüber denen nach der virtuellen Beurteilung ($M = 19.24, SD = 21.01$). Es handelt sich dabei um einen signifikanten Unterschied ($t_{(82)} = -4.78, p < .001, d = 0.64$) mit einer mittleren Effektstärke nach Cohen (1977).

Die größte Zunahme der Symptomschwere zeigte sich mit einer Differenz von 15.20 Punkten zur Vorher-Messung auf der Subskala *Disorientation* (Schwindel und Gleichgewichtsstörungen).

Die zweitgrößte Zunahme verzeichnete die *Nausea*-Skala (Symptome der Übelkeit) mit einem Anstieg von 7.92 Punkten.

Die Zunahme auf der *Oculomotor*-Skala (Symptome in Verbindung mit dem Augenbewegungsnerve) zeigte hier einen zur *Nausea*-Skala dem Betrag nach vergleichbaren Anstieg um 6.58 Punkte.

Die Differenz des SSQ-Score betrug 10.49 Punkte. Es fiel auf, dass, während die Zunahmen auf den Subskalen der gleichen Rangfolge entsprachen wie in der vorangegangenen Studie, die Beträge der Differenzen und somit die Schwere der Symptome in der vorliegenden Stichprobe insgesamt deutlich niedriger ausfielen.

Tabelle 15

Im Versuch aufgetretene Cybersickness-Symptome (N = 87)

Skala	Erhebungszeitpunkt	
	vor VR-Beurteilung	nach VR-Beurteilung
	Score	Score
SSQ-Score	8.52	19.01
Nausea	3.73	11.65
Oculomotor	10.75	17.33
Disorientation	6.40	21.60

Anmerkung. Die Berechnungsvorschrift und Gewichtung der Skalen kann Kennedy et al. (1993) entnommen werden. Die Angaben der Scores erfolgen nach einem listenweisen Fallausschluss pro Erhebungszeitpunkt.

5.4.5 Nebenbefund: Nach virtueller Innenraumbeurteilung gemessene Presence

Zur Vergleichbarkeit mit der vorangegangenen Studie (4.4.5) wurde in der Versuchsdurchführung erneut die *Presence* (2.1.2) mithilfe des SUS (4.3.3.1) erhoben. Hierbei wurden einerseits der von Slater, Usoh & Steed (1994) vorgeschlagene *SUS-Count* sowie andererseits der in einigen Publikationen (Nunez, 2007, S. 30) stattdessen ausgewiesene Mittelwert *SUS-Mean* pro Versuchsgruppe bestimmt (Tabelle 16).

Die zusätzliche Bestimmung der Indizes über die Gesamtstichprobe ($N = 87$) ergab einen *SUS-Count*: $M = 2.67$, $SD = 2.06$ und *SUS-Mean*: $M = 4.96$, $SD = 1.07$. Die Prüfung der internen Konsistenz der Items ergab Cronbachs $\alpha = .813$.

Tabelle 16

Empfundene Presence nach Art des Kollisionsfeedbacks (N = 87)

Index	Kollisionsfeedback					
	visuell n = 29		vibrotaktil n = 29		kombiniert n = 29	
	M	SD	M	SD	M	SD
<i>SUS-Count</i>	2.48	2.11	2.86	2.20	2.66	1.90
<i>SUS-Mean</i>	4.86	1.11	5.11	1.06	4.90	1.05

5.5 Diskussion

Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, Hypothesen zu prüfen, nach denen sich vibrotaktilen Feedback positiv auf die *Effizienz der Beurteilung* (H1), den *empfundene Realismus* der virtuellen Darstellung (H2) und die *empfundene Nützlichkeit* für die Beurteilung haptischer Eigenschaften (H3) auswirkt. Hierzu wurde die *Display Fidelity* (Abschnitt 2.1.1) eines immersiven virtuellen Fahrzeuginnenraums durch Ergänzung mit vibrotaktilen Feedback erweitert und die Auswirkung unter praxisnahen Bedingungen untersucht. Als Bestandteil der Arbeit wurde eine prototypische, armbandbasierte Lösung mit vibrotaktilen Kollisionsfeedback programmiert (Abschnitt 5.3.2.2) und in das bestehende VR-System *virtuelle Sitzkiste* (Abschnitt 2.2.4) integriert.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Hauptbefunde (5.5.1 bis 5.5.3) sowie die Nebenbefunde (5.5.4 und 5.5.5) diskutiert, die methodischen Einschränkungen (5.5.6) der Arbeit dargestellt sowie ein Ausblick (5.5.7) auf weiteren Forschungsbedarf und praktische Anwendung gegeben.

5.5.1 Einfluss von vibrotaktilen Feedback auf die Effizienz einer virtuellen Innenraumbeurteilung

Die Überprüfung der Hypothese, nach der die *Effizienz der Beurteilung* von haptischen Eigenschaften im virtuellen Fahrzeuginnenraum mit vibrotaktilen Feedback höher wäre als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung (H1), lieferte kein eindeutiges Ergebnis (5.4.1).

Die Beurteilung des Innenraums mit vibrotaktilen Feedback führte zu einer signifikanten Verkürzung der *Kontaktdauer zum virtuellen Fahrzeuginnenraum* um circa 30 % (-1:17 min) gegenüber der etablierten Methode mit visueller Rückmeldung. Bei einer Kombination der vibrotaktilen Rückmeldung mit der visuellen verkürzte sich die Kontaktdauer zum virtuellen Innenraum sogar um 60 % (-2:37 min) gegenüber der etablierten visuellen Kollisionsrückmeldung (Abbildung 48, S. 145). Gleichzeitig zeigte sich, dass die Verwendung des vibrotaktilen Feedbacks ohne zusätzliche Visualisierung zu einer signifikant längeren *Gesamtdauer der Innenraumbewertung* führte. So benötigte die Versuchsgruppe mit vibrotaktilen Feedback mit durchschnittlich 4:11 min länger als die Gruppe mit visuellem Feedback und 4:31 min länger als die Gruppe mit kombiniertem Kollisionsfeedback.

Eine mögliche Erklärung der hypothesenkonträren Zunahme der Beurteilungsdauer in der Versuchsbedingung mit vibrotaktilen Feedback kann darin gesehen werden, dass in dieser Bedingung jegliche visuelle Repräsentation der Versuchsperson fehlte. Da das zur Untersuchung verwendete System *virtuelle Sitzkiste* (2.2.4) über keine Avatardarstellung verfügte und die Versuchspersonen instruiert wurden, sich bei der Beurteilung auf die vibrotaktilen Hinweisreize zu verlassen, benötigten sie möglicherweise eine längere Orientierungszeit (siehe Abbildung 48, S. 145), um bspw. mit dem Handgelenk eine Armauflage zu finden. Erschwerend kam hinzu, dass bspw. die Beurteilung der Armauflagen eher im Ellenbogenbereich des Unterarmes stattfindet, während die Armbänder an den Handgelenken getragen wurden (die generelle Eignung wird in Abschnitt 5.2.3 diskutiert).

Für die praktische Verwendung von vibrotaktilen Feedback bedeutet dies, dass bspw. vibrotaktile Armbänder unbedingt visualisiert werden sollten (Avatardarstellung), um verlängerte Orientierungszeiten bei der Beurteilung zu vermeiden und gleichzeitig die Bewertungsanteile, in denen Kontakt zum Innenraum besteht, zu verkürzen.

Darüber hinaus konnte den Daten entnommen werden, dass trotz einer deutlichen Verkürzung der Kontaktdauer durch kombiniertes Feedback (visuell und vibrotaktil) sich die durchschnittliche Gesamtdauer der Innenraumbewertung in dieser Versuchsbedingung (9:33min) sich nur unwesentlich gegenüber der etablierten visuellen Kollisionsrückmeldung (9:53min) unterschied. Es wird schlussfolgernd an-

genommen, dass die an die Praxis angelehnte Form des Bewertungsvorgangs (Abschnitt 3.1.4), bei der ein Moderator die Beurteilungspunkte aus einem Katalog vorliest, die beurteilende Person dies akustisch aufnimmt, ggf. Rückfragen geklärt werden und schließlich das Bewertungsergebnis mündlich an den Moderator zurückgegeben wird, einen großen Teil der Gesamtdauer einnimmt.

Zusammenfassend ergibt sich für die praktische Nutzung von vibrotaktilen Feedback im Sinne der Effizienzsteigerung (H1), dass das vibrotaktile Feedback am besten mit einer Visualisierung der Armbänder verwendet werden sollte, um dem Benutzer eine schnellere Orientierung und visuelle Nachkontrolle zu ermöglichen. Unabhängig von der Art der Kollisionsrückmeldung wird die verbale Vermittlung der Beurteilungskriterien sowie der abgegebenen Bewertungen als größter zeitlicher Anteil im Bewertungsvorgang vermutet. Die Optimierung des Informationsaustausches bietet daher vermutlich ein größeres Potential für eine Effizienzsteigerung, als jede der getesteten Arten von Kollisionsfeedback. Die kombinierte Kollisionsrückmeldung erlaubte im Versuch eine Verkürzung der Gesamtdauer um circa 20 Sekunden bei einer circa 10-minütigen Beurteilung. Bei einer derart geringen Verkürzung kann der technische Aufwand, der für die kombinierte Kollisionsrückmeldung notwendig ist, in der Praxis nicht gerechtfertigt werden.

5.5.2 Einfluss von vibrotaktilen Feedback auf die empfundene Realitätsnähe

In Bezug auf die *empfundene Realitätsnähe* der Innenraumdarstellung des virtuellen Fahrzeugs (H2) zeigte sich in der Stichprobe, dass die Realitätsnähe in der Gruppe mit visuellem Feedback am niedrigsten empfunden wurde. Beide Gruppen mit vibrotaktilen Feedback hatten einen geringfügig höheren Wert gegenüber der visuellen Methode, wobei die kombinierte Kollisionsrückmeldung einen niedrigeren Wert erreichte als die rein vibrotaktile. Die in der Stichprobe vorgefundenen Mittelwertunterschiede wären für den praktischen Einsatz von vibrotaktilen Feedback unter dem Gesichtspunkt einer Steigerung der im virtuellen Prototyp empfundenen Realitätsnähe zu vernachlässigen, da hier andere technische Lösungen (bspw. hochauflösende Texturen, Avatardarstellung etc.) als mehrversprechende Alternativen in Frage kommen.

Dennoch ist der in der Stichprobe vorgefundene Trend insofern interessant, als dass die Werte in beiden Gruppen mit der visuellen Darstellung der Armbänder einen geringeren Wert aufwiesen. Letzteres ist möglicherweise ein Indiz dafür, dass die abstrakte Darstellung der Armbänder in Form halbtransparenter „Manschetten“ als weniger realistisch empfunden wird als das Fehlen einer Avatardarstellung (Abbildung 49).

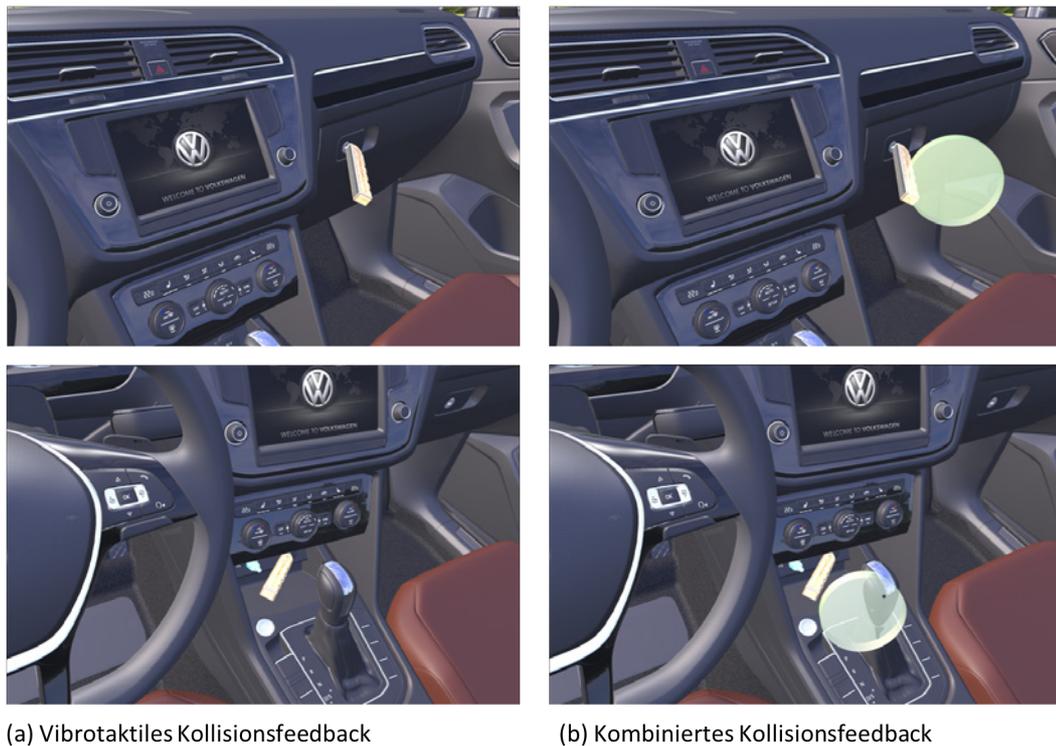


Abbildung 49: Gegenüberstellung der Visualisierung in den Gruppen „vibrotaktil“ (a, linkes Bilderpaar) ohne Visualisierung der Armbänder und „kombiniert“ (b, rechtes Bilderpaar) mit transparenten Manschetten bei der Beurteilung der Erreichbarkeit des Handschuhfachgriffs (oberes Bilderpaar) und der Medienanschlüsse (unteres Bilderpaar). Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Unterstützung der auf Haptik basierenden Eigenschaftsbeurteilungen (Abschnitt 5.1.4) mittels vibrotaktilen Feedback bietet die abstrakte halbtransparente Visualisierung einen Vorteil sowohl gegenüber einer menschenähnlichen Avatardarstellung, wie sie sich von Benutzenden häufig gewünscht wurde (siehe Abschnitt 3.4), als auch gegenüber dem Verzicht auf eine Avatardarstellung. Im folgenden Beispiel soll dies verdeutlicht werden. Bei vibrotaktilen Feedback kann die Bewegung einer Person nicht eingeschränkt werden, wie bspw. in einem Force-

Feedback-Aufbau (5.1.3). Die Ablage des Unterarms auf einer Armauflage im Beurteilungsvorgang erfolgt aus einer Bewegung heraus, die die Person beim Einsetzen des vibrotaktilen Feedbacks eigenständig stoppen muss. Wird die Bewegung aufgrund der Reaktionszeit zu spät gestoppt, taucht der Unterarm bereits zur Hälfte in die virtuelle Armauflage ein, statt diese nur auf der Oberfläche zu berühren. Es ist deshalb sinnvoll, der Beurteilungsperson die Möglichkeit zur visuellen Nachkontrolle zu geben, um die Endposition des Unterarms justieren zu können. Dies wurde im Versuch einerseits durch die Transparenz der Manschetten und andererseits durch deren einfache Geometrie unterstützt (Abbildung 50, mittlere Darstellung).



Abbildung 50: Vor- und Nachteile der visuellen Nachkontrolle bei der Beurteilung der Armauflage ohne eine Visualisierung der vibrotaktilen Armbänder (a), mit einer abstrakten Visualisierung (b) und mit einem menschenähnlichen Avatar (c). Quelle: Eigene Darstellung.

Bei Verwendung eines menschenähnlichen Avatars in der gleichen Bewertungsaufgabe würde der virtuelle Unterarm eine Verdeckung der Armauflage erzeugen (Abbildung 50, rechte Darstellung). Die Beurteilenden hätten somit keine Möglichkeit zur visuellen Kontrolle, ob der Unterarm die Fläche gerade erst berührt hat oder bspw. bereits zur Hälfte in die Ablage eingetaucht wurde.

5.5.3 Eignung von vibrotaktilen Feedback für die Bewertung haptischer Eigenschaften

Die Verwendung des vibrotaktilen Feedbacks ist der Versuch, haptische Eigenschaften (wie Erreichbarkeit, Auslegung der Armauflagen, Freigänge und Bewegungsfreiheit) im virtuellen Fahrzeuginnenraum bewertbar zu machen bzw. deren Beurteilung zu verbessern. Hierzu wurde geprüft, ob die Benutzerinnen und Benutzer die eingesetzten Methoden des Kollisionsfeedbacks als *Hilfestellung bei der*

Beurteilung von haptischen Eigenschaften eines Fahrzeuginnenraums empfanden (H3).

Die minimalen in der Stichprobe aufgetretenen Unterschiede zwischen der visuellen Kollisionsrückmeldung und den beiden Versuchsbedingungen mit vibrotaktilem Feedback sind ein Indiz dafür, dass die prototypische Lösung über einige Defizite für die Bewertung haptischer Eigenschaften verfügte, wie sie zum Teil bereits in den vorhergehenden Abschnitten 5.5.2 und 5.5.3 diskutiert wurden.

Durch die praxisnahe Versuchsdurchführung konnten Vor- und Nachteile sowie Grenzen der prototypischen vibrotaktilem Lösung für die Bewertung von haptischen Innenraumeigenschaften aufgezeigt werden. Diese werden daher im Folgenden als Anhaltspunkt für spätere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich des vibrotaktilem Feedbacks zusammengefasst.

Die Bewertungsaufgaben der Erreichbarkeit von Bedienelementen, der Auslegung von Armauflagen, der Freigänge sowie der Bewegungsfreiheit im Innenraum stellen jeweils individuelle Ansprüche an eine armbandbasierte, vibrotaktile Kollisionsrückmeldung.

Für die *Beurteilung von Erreichbarkeiten* stellen die Armbänder generell eine gute Ausgangsbasis dar. Die Erreichbarkeitsprüfungen wurden mithilfe des Pointers (siehe 2.2.4) durchgeführt, wobei der Zeigefinger der Bewertenden auf der Spitze des Pointers lag (Abbildung 18, S. 29), um festzustellen, wann der Zeigefinger das zu bewertende Element im Innenraum berühren würde und anschließend eine Bewertung darüber abzugeben, wie gut dieses Innenraumelement erreichbar war (ob sich die Person zum Beispiel dafür sehr weit strecken musste). Berührten die Teilnehmenden ein Innenraumelement, konnten sie durch vibrotaktilen Kollisionsfeedback effizienter und intuitiver feststellen, ob und wann der Kontakt zum virtuellen Fahrzeuginnenraum entstand.

Die Bestimmung der Entfernung des Pointers zu beiden Armbändern in der entwickelten Ansteuerungslogik (Abschnitt 5.3.2.3) sorgte dafür, dass das vibrotaktile Feedback jeweils am Handgelenk der Hand ausgelöst wurde, in welcher sich der Pointer befand. Durch die Nähe des Armbandes am Handgelenk zum Pointer entstand eine plausible Kollisionsrückmeldung. Die Vibration schien dabei vom Pointer auszugehen und nicht vom eigentlichen Armband.

Die *Bewertung der Armauflagen* als zweite Gruppe der Bewertungsaufgaben stellte eine größere Herausforderung dar. Die Trageposition der Armbänder am Handgelenk ist für diese Bewertung nur bedingt geeignet, da Armauflagen im Fahrzeug häufig mit dem Bereich um den Ellbogen benutzt werden, während das Handgelenk keinen Kontakt hat. Für die Bewertung der Armauflagen wäre daher eine Trageposition am Unterarm in der Nähe des Ellbogens sinnvoller gewesen (Abbildung 51, blaue Markierung). Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung von zwei Armbändern pro Unterarm. Diese Konfiguration hätte zusätzlich den Vorteil, dass die Ausrichtung des Unterarms aus der Position beider getrackter Armbänder berechnet und für eine präzisere Kollisionsrückmeldung verwendet werden könnte. Der Nachteil wäre eine erhöhte Ausrüstzeit und erhöhter Kalibrierungsaufwand vor jedem Bewertungsvorgang sowie eine Reduktion des Tragekomforts.

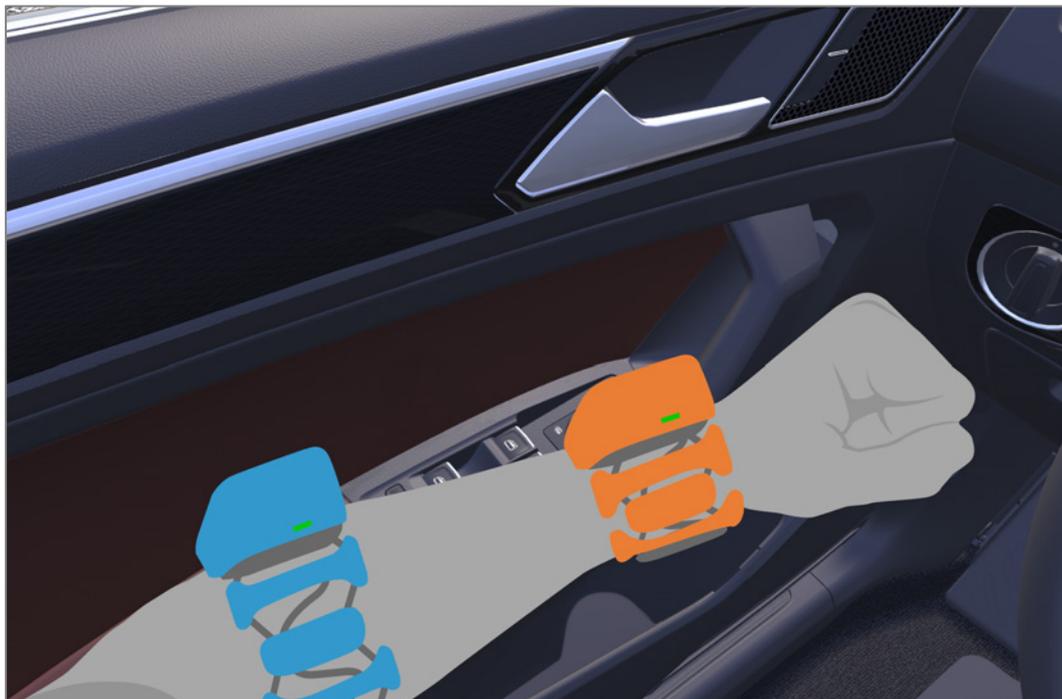


Abbildung 51: Position des im Versuch am Handgelenk getragenen VibroTac (orange) und für die Bewertung der Armauflagen besser geeignete Position am Unterarm (blau). Quelle: Eigene Darstellung.

Auch bei der dritten Gruppe der haptischen Bewertungseigenschaften, der *Bewegungsfreiheit* im virtuellen Fahrzeuginnenraum, wurde ähnlich der Bewertung der Armauflagen deutlich, dass die Trageposition der Armbänder am Handgelenk ungeeignet ist. Ist die Bewegungsfreiheit in einem realen Fahrzeug einschränkend,

sind es die äußeren Extremitäten wie die Ellbogen, Hände, Knie und Füße, vor allem aber die Augen, mit denen ein Insasse dies wahrnimmt. Durch die Trageposition am Handgelenk entstand eher eine unnatürliche Interaktion, da einige Teilnehmende versuchten, mit den Handgelenken auszumessen, wo sich die Grenzen des virtuellen Innenraums befinden. Hierfür wäre eine menschenähnliche Avatardarstellung sicherlich besser geeignet, sofern diese über ein präzises Tracking verfügen würde. Dennoch war es den Teilnehmenden möglich, mithilfe der Armbänder auch Grenzen außerhalb des Sichtfeldes des HMDs aufzuspüren. Sie taten dies häufig, indem sie die Hände zur Faust formten und dann langsam nach links und rechts, teilweise auch nach vorn ausstreckten, bis eine Vibration einen Kontakt signalisierte. Einige Versuchspersonen bewerteten die Kopffreiheit, indem sie den Pointer nach oben führten, bis dieser mit dem virtuellen Dachhimmel kollidierte, während ihr Blick nach vorn auf die Straße gerichtet war. Die Nutzung der kinästhetischen Informationen durch vibrotaktile Kollisionsrückmeldung ist daher ein vielversprechender Schritt dahin, auf das Raumangebot bezogene Bewertungsaspekte trotz eingeschränkter visueller Wahrnehmung bewerten zu können. Dies setzt eine konzeptuelle Anpassung der vibrotaktilen Feedback-Devices voraus, die separat zu untersuchen wäre.

Die vierte Gruppe der haptischen Bewertungseigenschaften war die *Bewertung der Freigänge*. In der Realität ist diese wichtig, um festzustellen, ob ein Innenraumelement (z. B. Schalter, Hebel, Anschlussbuchse), das an einer verwinkelten Stelle positioniert ist, dennoch gut erreicht werden kann, also ob genug Freigang für die Hand zwischen den umgebenden Innenraumelementen gegeben ist. Hierfür wurde die selektive, richtungsabhängige Ansteuerung der Vibrationselemente konzipiert (5.3.2.3). Durch diese hatten die Bewertenden die Möglichkeit zu spüren, welche Seite des Handgelenks in einer Engstelle mit dem Fahrzeug als erste kollidierte.

Die Teilnehmenden berichteten während der Übungsaufgaben, die vor der Innenraumbewertung durchgeführt wurden, dass die Kontaktstelle am Handgelenk (Kollisionsrichtung) gut erkennbar und zu unterscheiden sei. Während der folgenden Innenraumbewertung zeigte sich jedoch, dass die vibrotaktilen Armbänder nicht den komplexen Eindruck simulieren konnten, der im physischen Prototyp bspw. beim Hängenbleiben mit den Ärmeln der Kleidung entsteht, während die Person

versucht, etwas aus einer verengten Ablage herauszuholen oder mit den Fingern zu ertasten.

Dennoch lässt sich mit Hilfe der Armbänder mindestens auf relevante Engstellen im virtuellen Fahrzeug hinweisen, die ohne das vibrotaktile Feedback nicht wahrgenommen und ggf. falsch bewertet werden würden. So war es den Teilnehmenden bspw. häufig nicht bewusst, dass sie bei der Erreichbarkeitsbewertung der Medienanschlüsse im virtuellen Fahrzeug in einer tief liegenden Ablage den Gangwahlhebel mit ihrem Ärmel berühren würden (Abbildung 52, linke Darstellung). Durch die Visualisierung der Armbänder konnten die Benutzenden eine Kollision (visuelle Überschneidung) mit dem Gangwahlhebel sehen, wenn sie explizit darauf achteten und die Bewegung zur Ablage nicht zu schnell geschah (Abbildung 52, rechte Darstellung). In den Gruppen mit vibrotaktilen und kombiniertem Kollisionsfeedback nahmen die Beurteilenden die Kollision auch während einer schnellen Bewegung oder visuellen Unaufmerksamkeit durch die Vibrationsimpulse wahr.

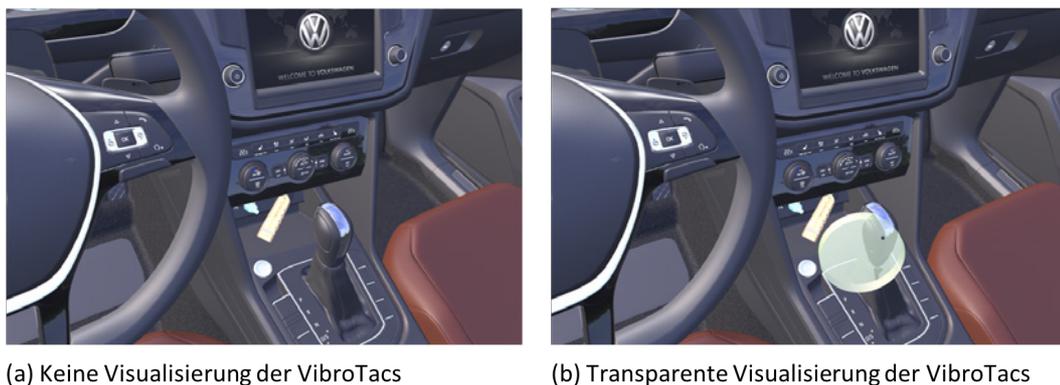


Abbildung 52: Gegenüberstellung der Erreichbarkeitsbewertung von Medienanschlüssen (a) ohne Avatar-Visualisierung und (b) mit Visualisierung der vibrotaktilen Armbänder. Quelle: Eigene Darstellung.

5.5.4 Nebenbefund: Durch virtuelle Innenraumbeurteilung verursachte Cybersickness

Im Vergleich zur vorhergehenden Untersuchung (Abschnitte 4.4.4 und 4.5.4) konnte eine geringere Cybersickness gemessen werden (5.4.4). Der ermittelte *SSQ-Score* lag bei 19.01 Punkten und somit deutlich unterhalb der zuvor gemessenen 26.18 Punkte. Die Betrachtung der Subskalen (Symptomprofil) zeigte die gleiche Rangfolge, bei insgesamt niedrigeren Werten.

Der Grund für die niedrigere Cybersickness wird hinter drei möglichen Einflussfaktoren vermutet. Im Unterschied zur vorhergehenden Studie wurde durch systemseitige Aufrüstung von Soft- und Hardware die *Display Fidelity* der *virtuellen Sitzkiste* insgesamt erhöht. Weiterhin wurde die in beiden Untersuchungen verwendete 3D-Szene nochmals für eine bessere Anzeigeleistung softwareseitig optimiert (Abschnitt 5.3.2.4). Zusätzlich war die durchschnittliche Aufenthaltsdauer in der IVU im zweiten Versuch fast um die Hälfte kürzer und betrug ca. 17 statt der 31 Minuten des ersten Versuchs.

5.5.5 Nebenbefund: Durch virtuelle Innenraumbeurteilung erzeuge Presence

Auch die gemessene *Presence* verbesserte sich ähnlich der *Cybersickness* im Vergleich zum ersten Versuch. Der *SUS-Count* ($M = 2.67$, $SD = 2.06$) lag leicht über dem Wert des ersten Versuchs ($M = 2.16$, $SD = 1.92$). Als Ursache der Verbesserung kommen ebenfalls die bereits im vorangehenden Abschnitt 5.5.4 diskutierten Faktoren in Frage.

5.5.6 Methodische Einschränkungen

Die zuvor beschriebene Studie unterlag einigen methodischen Einschränkungen. Aufgrund eines defekten Ein- und Ausschalters ließ sich das Einschaltverhalten eines der Armbänder nicht zuverlässig vorhersagen. Aus diesem Grund war es an den Versuchstagen nicht möglich, die Untersuchungsteilnehmer randomisiert den Versuchsbedingungen zuzuteilen. Es wurde daher ein quasi-experimentelles Untersuchungsdesign verwendet und die Versuchsgruppen hinsichtlich des Geschlechts, der Körpergröße und des Alters parallelisiert sowie die Ausprägungen des Kollisionsfeedbacks visuell, vibrotaktil und kombiniert möglichst gleichmäßig auf Vor- und Nachmittagszeiten verteilt. Die Parallelisierung erfolgte im Rahmen der verfügbaren Ressourcen, sollte jedoch nicht als vollständig betrachtet werden, da bspw. Vorerfahrungen mit IVU unberücksichtigt blieben. Aufgrund strenger Auflagen und hieraus bedingter Nutzung eines internen Access-Panels wurde eine selbstselektive Gelegenheitsstichprobe gezogen, bei der eine Affinität oder zumindest Neugier zum Themenkomplex Virtuelle Realität angenommen werden kann.

Durch das in der Praxis übliche Vorgehen, dem Bewertenden die Bewertungskriterien des Fragebogens vorzulesen, bleibt ein Einfluss des Versuchsleiters auf die Untersuchung nicht ausgeschlossen. So wird bspw. die Dauer der Innenraumbewertung durch die individuelle Sprech- und Vorlesegeschwindigkeit beeinflusst und würde möglicherweise bei einer Replikation zu abweichenden Durchführungs- und Bewertungszeiten führen.

Die prototypische Umsetzung der vibrotaktilen Kollisionsrückmeldung bot nur eine eingeschränkte Genauigkeit des Innenraums, da die Fahrzeuginnenflächen durch manuell nachgebildete Kollisionsflächen repräsentiert werden mussten und eine einheitliche Handgelenkgröße für alle Versuchspersonen verwendet wurde.

Aufgrund der genannten methodischen Einschränkungen wird die Generalisierung der Befunde (externe Validität) zwar herabgesetzt, gleichzeitig weist die Studie eine hohe Gültigkeit der Ergebnisse in Bezug auf das untersuchte VR-System (interne Validität) auf.

5.5.7 Fazit und Ausblick

Die Untersuchung ergab, dass der Einsatz des vibrotaktilen Feedbacks einen signifikanten Einfluss auf die *Effizienz der Innenraumbewertungsaufgabe* (H1) hatte. Ohne eine zusätzliche Visualisierung der Armbänder war die Gesamtdauer der Beurteilungsaufgabe gegenüber der rein visuellen Kollisionsrückmeldung jedoch länger. In Kombination mit einer Visualisierung wurde die Gesamtdauer hingegen positiv beeinflusst. Es handelt sich dabei um einen kleinen bis mittleren Effekt. Es gab keinen signifikanten Einfluss auf die *empfundene Realitätsnähe* (H2) oder die empfundene *Eignung des Kollisionsfeedbacks für haptische Beurteilungsaufgaben* (H3). Aus praktischer Sicht sind die vorgefundenen Unterschiede zu gering, um den für das vibrotaktile Feedback benötigten technischen und finanziellen Aufwand rechtfertigen zu können. Eine Übersicht der durchgeführten Hypothesentests kann Tabelle 17 entnommen werden.

Das vibrotaktile Feedback erweiterte die Innenraumbewertung um die Möglichkeit, Benutzerinnen und Benutzer auf Kollisionen bei der Beurteilung von haptischen Eigenschaften im virtuellen Fahrzeugprototyp aufmerksam zu machen. In der Diskussion der Befunde wurde dargelegt, dass die prototypische armbandbasierte Lösung einige Vor- und Nachteile für die Bewertung von Eigenschaften in virtuellen

Fahrzeuginnenräumen aufwies. Die zwei an den Handgelenken getragenen Armbänder waren hinsichtlich der Trageposition für die Beurteilung fahrzeuginnenraumspezifischer Fragestellungen nur bedingt geeignet. Die vibrotaktile Kollisionsrückmeldung konnte die Versuchspersonen zwar auf grundlegende Probleme aufmerksam machen (z.B. dem Kollidieren der Hand mit dem Gangwahlhebel bei Benutzung einer dahinterliegenden Ablage), jedoch nur unzureichend die Komplexität der Situation abbilden, wie sie in der Realität auftreten würde (wie z.B. am Gangwahlhebel hängenbleibende Jackenärmel).

Tabelle 17

Übersicht der durchgeführten Hypothesentests

Hypothese	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2	bestätigt
H1 Die <i>Effizienz der Beurteilung</i> von haptischen Eigenschaften im virtuellen Fahrzeuginnenraum mit vibrotaktilen Feedback ist höher als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung.					
Kollisionen während der Innenraumbewertung (AV1a)	2,83	12.44	< .001	.230	Ja
Gesamtdauer der Innenraumbewertung (AV1b)	2,83	7.57	< .001	.154	Nein
H2 Die <i>empfundene Realitätsnähe</i> der virtuellen Fahrzeuginnenraumdarstellung mit vibrotaktilen Feedback ist höher als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung.	2,84	1.31	.275	.030	Nein
H3 Die <i>empfundene Eignung</i> des vibrotaktilen Feedbacks bei der Beurteilung der virtuellen Fahrzeuginnenraumdarstellung ist höher als bei der rein visuellen Kollisionsrückmeldung.	2,84	0.18	.838	.004	Nein

Anmerkung. Die Angabe tatsächlicher p-Werte kleiner .001 erfolgt gemäß APA-Style (6th) als <.001.

Insgesamt kann der Einsatz der prototypischen Lösung, wie sie in dieser Studie verwendet wurde, daher nicht für den praktischen Einsatz empfohlen werden. Entsprechende Erfahrungswerte und Hinweise für die Umsetzung anderer haptischer Kollisionsrückmeldungslösungen können der Ergebnisdiskussion entnommen werden. Über die beschriebenen Einschränkungen der verwendeten Lösung hinaus wurde die Möglichkeit zur haptischen Kollisionsrückmeldung im virtuellen Fahrzeug von den Versuchspersonen überwiegend positiv aufgenommen.

Haptische Kollisionsrückmeldung – unabhängig von der vorgestellten prototypischen Lösung – verspricht daher weiterhin ein großes Potential für die haptische

Beurteilung von Prototypen in IVU. Zukünftige Arbeiten im Bereich der Automobilentwicklung sollten sich speziell auf die Untersuchung kleinerer, an der Hand und am Ellbogen getragener Feedback-Devices fokussieren, da die dortige Kollisionsrückmeldung eher dem natürlichen Beurteilungsvorgang relevanter Fragestellungen (wie Bewertung der Bewegungsfreiheit im Bereich des Oberkörpers und der Position der Armauflagen) entsprechen würde. Gleichzeitig bleibt jedoch die Hand mit ihren Fingern das wichtigste Werkzeug bei der Bewertung von haptischen Eigenschaften. Es wäre daher von großem Interesse, miniaturisierte und kabellose vibrotaktile Feedback-Devices direkt an der Hand oder bestenfalls an einzelnen Fingern tragen zu können. Durch den derzeit erreichbaren Grad an Miniaturisierung von tragbaren, kabellosen Ausgabegeräten ist die technische Realisierbarkeit kleinster taktile Feedback-Devices in nicht allzu ferner Zukunft zu erwarten. Die als Beispiel genannten, von Apple 2016 vorgestellten AirPods-Kopfhörer wiegen bspw. gerade einmal vier Gramm pro Einheit und beinhalten neben der Schallerzeugungseinheit mit einem Akku, einem Mikrofon, einem Infrarotsensor und einem Bluetooth-Kommunikationsmodul (Apple Inc., 2016), bereits viele der für ein taktiles Feedback-Device benötigten Grundkomponenten.



(a) Apple AirPods



(b) Röntgenaufnahme der Elektronik

Abbildung 53: Apple AirPods als Beispiel für die Miniaturisierung von tragbaren, kabellosen Ausgabegeräten. Quelle: iFixit.com (2016).

Ein taktiles Feedback-Device dieser Größe könnte bei entsprechender Bauform an einzelnen Fingern getragen und mit weiteren am Körper getragenen Devices gekoppelt sein. Über inverse Kinematik ließe sich dann ggf. ein Körpermodell bilden, das sich automatisch auf die Anthropometrie der Benutzenden kalibriert und eine weitaus höhere *Display Fidelity* ermöglicht als die im Versuch verwendeten Arm-bänder.

6 Fazit der Arbeit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde in einem Mixed-Methods-Ansatz der Einfluss der *Display Fidelity* auf die Beurteilung von immersiven virtuellen Prototypen unter verschiedenen Gesichtspunkten erforscht. Es wurden zunächst in einer explorativen Vorstudie die für die Beurteilung von Fahrzeuginnenräumen relevanten Aspekte der *Display Fidelity* sowie deren Stärken und Schwächen durch eine Benutzerbefragung identifiziert. Das Ziel war es, mögliche Barrieren für den Einsatz der immersiven virtuellen Prototypen aus Nutzersicht zu identifizieren und diese vertiefend empirisch zu untersuchen.

Darauf aufbauend wurden zwei quasi-experimentelle Laboruntersuchungen durchgeführt. Zur Steigerung der externen Validität wurden die Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt, gleichzeitig jedoch darauf geachtet, eine größtmögliche experimentelle Kontrolle zu wahren.

Der Fokus der ersten Studie lag darauf zu überprüfen, ob die Beurteilung eines immersiven virtuellen Fahrzeuginnenraums zu abweichenden Beurteilungsergebnissen führen würde, wie von den in der Vorstudie befragten Fahrzeugexperten vermutet. Die Untersuchung ergab, dass die Beurteilung des Raumgefühls in dem zur Untersuchung genutzten System *virtuelle Sitzkiste* signifikante Unterschiede der Beurteilungsergebnisse gegenüber physischen Prototypen aufwies. Bei der virtuellen Beurteilung der *Erreichbarkeiten von Innenraumelementen* und der *Sicht nach außen* zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zu den physischen Prototypen. Bei der Untersuchung wurden aus forschungsökonomischen Gründen lediglich drei sehr spezifische, in der Praxis häufig durchgeführte Innenraumbewertungen (*Erreichbarkeit von Bedienelementen*, *Sicht nach außen* und *Raumgefühl*) untersucht. Es konnte aufgezeigt werden, dass die von den Fahrzeugexperten in der Vorstudie vermuteten falschen Eindrücke des Raumgefühls des virtuellen Prototyps zu verfälschten Beurteilungsergebnissen geführt haben. Die Beurteilung von Raumgefühl in immersiven virtuellen Fahrzeugprototypen in anderen Systemen sollte daher nicht ohne eine Überprüfung der Zuverlässigkeit der Beurteilungsergebnisse vorgenommen werden. Es zeigte sich auch, dass es an einer theoriebasierten Definition und eines Messinstruments für das Konstrukt „Raumgefühl“ mangelte, dessen virtuelle Beurteilung und Erforschung sicherlich über den Automobilkontext hinaus reicht.

Konträr verhielt es sich bei der Beurteilung der Erreichbarkeiten unter Zuhilfenahme des Pointers und ohne Avatardarstellung. Hier konnte kein Unterschied der Beurteilungsergebnisse aus dem virtuellem gegenüber dem realen Fahrzeug und dem physischen Prototyp festgestellt werden.

Auch ein Auftreten von Cybersickness sollte bei praktischen Beurteilungsvorgängen stärker beachtet werden. Ein Vergleich der auftretenden Symptome zwischen der ersten und zweiten Hauptstudie lieferte Hinweise darauf, dass eine höhere *Display Fidelity* sowie eine kürzere Beurteilungsdauer zu geringeren Symptomen führen können.

Das Ziel der zweiten quantitativen Studie lag darin zu untersuchen, ob vibrotaktiler Feedback die Beurteilung haptischer Eigenschaften im virtuellen Fahrzeugprototyp verbessern könne. Hierzu wurde eine prototypische Lösung mit zwei kabellosen Armbändern aufgebaut und in die *virtuelle Sitzkiste* integriert. In der anschließenden quasi-experimentellen Laboruntersuchung anhand der prototypischen Lösung konnte kein signifikanter Einfluss (minimale, nicht praxisrelevante Mittelwertunterschiede) auf die *empfundene Realitätsnähe* oder *Nützlichkeit für die Bewertung haptischer Eigenschaften* festgestellt werden. Die Untersuchung ergab einen negativen Einfluss des vibrotaktilen Feedbacks auf die Effizienz der Beurteilungsaufgabe für haptische Eigenschaften, sofern die vibrotaktilen Armbänder ohne zusätzliche Visualisierung verwendet wurden. Dieser Effekt wurde umgekehrt, sobald das vibrotaktile Feedback mit einer Visualisierung der Devices kombiniert wurde. Letzteres führte zu einer geringen Steigerung der Beurteilungseffizienz.

Bei der Durchführung der Untersuchung zeigte sich, dass die universelle Trageposition der vibrotaktilen Armbänder an den Handgelenken zu unspezifisch für einige Bewertungsaufgaben in einem virtuellen Fahrzeuginnenraum war. Es ist anzunehmen, dass eine spezifische Trageposition solcher Feedback-Devices (bspw. an Handrücken und Ellbogen), auch bei der Anwendung in anderen VR-Systemen und im Kontext nicht automobiler Prototypenbeurteilungen, eine wichtige Rolle spielt und ein großes Augenmerk verlangt. Aufgrund dessen kann der Einsatz, der in dieser Arbeit entwickelten und vorgestellten prototypischen Lösung mit zwei an Handgelenken getragenen Armbändern, nicht für die praktische Beurteilungstätigkeit empfohlen werden.

Ein weiterer in der Untersuchung nicht berücksichtigter Aspekt war die Qualität der Beurteilungsergebnisse, bei deren Erhebung das vibrotaktile Feedback zum Einsatz kam. Obgleich der technische Aufwand für den Einsatz der Lösung nicht durch die Untersuchungsergebnisse zur Effizienzsteigerung gerechtfertigt oder empfohlen werden kann, ist es denkbar, dass die vibrotaktile Lösung unter optimierten Bedingungen (Visualisierung der Devices und für die Beurteilungsaufgabe spezifischere Trageposition) eine Verbesserung der Qualität der Beurteilungsergebnisse zur Folge hätte. Unter diesem Gesichtspunkt wäre eine Untersuchung zum Einfluss von vibrotaktilen Feedback auf die Qualität der Beurteilungsergebnisse wünschenswert.

Während der durchgeführten Untersuchungen zeigte sich ein Bedarf an standardisierten Testbatterien für die Erforschung von *Display Fidelity* in IVU und zur Untersuchung neuer prototypischer Lösungen. Die Beurteilung der Erreichbarkeit eines virtuellen Objekts in einer IVU kann bspw. als elementare haptische Bewertungsaufgabe verstanden werden, die über den Kontext eines virtuellen Fahrzeugprototyps hinausreicht. Die Ableitung universeller auf natürlicher Interaktion mit physischen Prototypen basierender Aufgaben wie Erreichen, Auffinden, Unterscheiden etc. und die Entwicklung empirisch geprüfter Testbatterien könnte sowohl die Vergleichbarkeit als auch die Validität und Reliabilität von Untersuchungen der *Display Fidelity* bspw. im Bereich der haptischen Darstellung verbessern.

7 Literaturverzeichnis

- Achleitner, A., Antony, P., Berger, E., Burgers, C., Döllner, G., Ebner, N. et al. (2016). Formen und neue Konzepte. In S. Pischinger & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 131–251). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09528-4_4
- ADAC e.V. (2016, Juni). ADAC Autotest: VW Tiguan 2.0 TDI SCR BMT Highline 4MOTION DSG (7-Gang). *ADAC Auto-Test*. Zugriff am 3.12.2017. Verfügbar unter: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/autotest/at5467_vw_tiguan_2_0_tdi_scr_bmt_highline_4motion_dsg_7_gang/vw_tiguan_2_0_tdi_scr_bmt_highline_4motion_dsg_7_gang.pdf
- Apple Inc. (2016). AirPods - Technische Daten. Zugriff am 29.5.2017. Verfügbar unter: https://support.apple.com/kb/SP750?viewlocale=de_AT&locale=de_AT
- Arthur, K. W. (2000). *Effects of field of view on performance with head-mounted displays*. University of North Carolina at Chapel Hill. Zugriff am 19.2.2016. Verfügbar unter: <http://wwwx.cs.unc.edu/Research/eve/dissertations/2000-Arthur.pdf>
- Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T. & Slater, M. (1995). Presence and performance within virtual environments. In W. Barfield & T.A. Furness III (Hrsg.), *Virtual Environments and Advanced Interface Design* (S. 473–513). New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc. Verfügbar unter: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=216164.216189>
- Bonato, F., Bubka, A. & Palmisano, S. (2009). Combined Pitch and Roll and Cybersickness in a Virtual Environment. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 80 (11), 941–945. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2394.2009>
- Bortz, J. & Döring, N. (2009). *Forschungsmethoden und Evaluation: für Human- und Sozialwissenschaftler* (Springer-Lehrbuch : Bachelor, Master) (4., überarb. Aufl., Nachdr.). Heidelberg: Springer-Medizin-Verl.
- Bowman, D. A. & Hodges, L. F. (1999). Formalizing the design, evaluation, and application of interaction techniques for immersive virtual environments. *Journal of Visual Languages & Computing*, 10 (1), 37–53.
- Bowman, D. A. & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 40 (7), 36–43. <https://doi.org/10.1109/MC.2007.257>
- Bowman, D. A., Stinson, C., Ragan, E. D., Scerbo, S., Höllerer, T., Lee, C. et al. (2012). Evaluating effectiveness in virtual environments with MR simulation. *The Interservice/Industry Training, Simulation & Education Conference (IITSEC)* (Band 2012). NTSA.
- Braess, H.-H. (2012). Produktentstehungsprozess: Mess- und Versuchstechnik. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 881–948). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8298-1_11
- Braess, H.-H., Breitling, T., Weissinger, J., Grawunder, N., Hackenberg, U., Liskowsky, V. et al. (2016). Produktentstehungsprozess. In S. Pischinger & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 1257–

- 1369). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-09528-4_11
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (Hrsg.). (2012). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8298-1>
- Bubb, H., Bengler, K., Grünen, R. E. & Vollrath, M. (Hrsg.). (2015). *Automobilergonomie* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Bubb, H., Goßmann, H., Konorsa, R., Pecho, W., Plath, A., Reichhold, J. et al. (2016). Aufbau. In S. Pischinger & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 575–734). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09528-4_6
- Burdea, G. C. (1999). Keynote address: haptics feedback for virtual reality. *Proceedings of international workshop on virtual prototyping. Laval, France* (S. 87–96). Zugriff am 14.4.2016. Verfügbar unter: http://www.ti.rutgers.edu/publications/papers/1999_laval.pdf
- Burdea, G. C. (2000). Haptics issues in virtual environments. *Computer Graphics International, 2000. Proceedings* (S. 295–302). IEEE. Zugriff am 14.4.2016. Verfügbar unter: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=852345
- Burdea, G. C. & Coiffet, P. (2003). *Virtual Reality Technology* (2. Auflage). New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Bystrom, K.-E., Barfield, W. & Hendrix, C. (1999). A Conceptual Model of the Sense of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8 (2), 241–244.
<https://doi.org/10.1162/105474699566107>
- Cohen, J. (1977). The Concepts of Power Analysis. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (S. 1–17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-179060-8.50006-2>
- Creem-Regehr, S. H., Willemsen, P., Gooch, A. A. & Thompson, W. B. (2003). The Influence of Restricted Viewing Conditions on Egocentric Distance Perception: Implications for Real and Virtual Environments. *Perception*, 34, 191–204.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. & DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE (S. 135–142). Gehalten auf der Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 166134: ACM.
<https://doi.org/10.1145/166117.166134>
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. & Hart, J. C. (1992). The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment. *Commun. ACM*, 35 (6), 64–72. <https://doi.org/10.1145/129888.129892>
- Cutting, J. E. & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth (Handbook of perception and cognition (2nd ed.)). In W. Epstein & S.J. Rogers (Hrsg.), *Perception of space and motion* (S. 69–117). San Diego, CA, US: Academic Press.

- Dai, F., Felger, W., Frühauf, T., Göbel, M., Reiners, D. & Zachmann, G. (1996). Virtual Prototyping Examples for Automotive Industries. *Virtual Reality World*.
- Dai, F. & Reindl, P. (1996). Enabling Digital Mock-up with Virtual Reality Techniques - Vision, Concept and Demonstrator. Gehalten auf der ASME, Irvine, California, USA.
- Därr, J. J. (2010). *Vergleich der visuellen Wahrnehmung von realen und virtuellen Umgebungen am Beispiel einer Flugzeugkabine* (1. Aufl.). Göttingen: Cuvillier.
- Dassault Systemes 3DExcite GmbH (Hrsg.). (2017). 3DEXCITE DELTAGEN User Guide. Zugriff am 27.3.2018. Verfügbar unter: http://support.3dexcite.com/wp-content/uploads/2017/10/DELTA-GEN2017x/3DEXCITE_DELTAGEN_2017x_UserGuide_ENG.pdf
- Davis, F. D. (1986). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: Theory and results*. Massachusetts Institute of Technology. Zugriff am 17.6.2016. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Fred_Davis2/publication/35465050_A_technology_acceptance_model_for_empirically_testing_new_end-user_information_systems_theory_and_results_/links/0c960519fbaddf3ba7000000.pdf
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (Springer-Lehrbuch) (5. Auflage). Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5_5
- Engineering Systems Technologies. (2014). EST, Engineering Systems Technologies GmbH & Co. KG. Verfügbar unter: <https://www.est-kl.com>
- Gerathwohl, S. J. (1969). *Fidelity of simulation and transfer of training a review of the problem*. Washington, D.C.: Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aviation Medicine.
- Goldstein, E. B. (2010). *Sensation and perception* (8th Auflage). Belmont, Calif.: Thomson Wadsworth.
- Gomes de Sá, A. & Zachmann, G. (1998). Integrating Virtual Reality for Virtual Prototyping. *Proc. of the 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences*. Atlanta, Georgia. Verfügbar unter: <http://zach.in.tu-clausthal.de/papers/asme98.html>
- Gomes de Sá, A. & Zachmann, G. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, 23 (3), 389–403. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(99\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00047-3)
- Hager, W. (1987). Grundlagen einer Versuchsplanung zur Prüfung empirischer Hypothesen in der Psychologie. In G. Lüer (Hrsg.), *Allgemeine Experimentelle Psychologie* (S. 43–197). Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Hans Dieter Futschik. (2012). Formen und neue Konzepte: Design. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 84–157). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8298-1_4
- Hayward, V. & Astley, O. R. (1996). Performance Measures for Haptic Interfaces, 195–206. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0765-1_22

- Hayward, V., Astley, O. R., Cruz-Hernandez, M., Grant, D. & Robles-De-La-Torre, G. (2004). Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24 (1), 16–29. <https://doi.org/10.1108/02602280410515770>
- Hoffman, D. M., Girshick, A. R., Akeley, K. & Banks, M. S. (2008). Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*, 8 (3), 33–33. <https://doi.org/10.1167/8.3.33>
- Huang, F., Chen, K. & Wetzstein, G. (2015). The Light Field Stereoscope: Immersive Computer Graphics via Factored Near-Eye Light Field Displays with Focus Cues. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH)*, (4).
- Hudelmaier, J. (2003). *Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegung und individuellen Körpercharakteristika*. Dissertation. München: Technische Universität München.
- Husung, S., Wall, K., Pöschl, S., Weber, C. & Döring, N. (2013). Netzwerkbasierter Mehrkanal-Soundserver für audio-visuelle VR-Anwendungen. In H.N.I.U. Paderborn (Hrsg.), . *Gehalten auf der Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme.*, Schriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts.
- iFixit.com. (2016). AirPods Teardown - iFixit. *iFixit*. Zugriff am 29.5.2017. Verfügbar unter: <https://www.ifixit.com/Teardown/AirPods+Teardown/75578>
- ISPR. (2000). International Society for Presence Research - Presence defined. Verfügbar unter: <http://ispr.info/about-presence-2/about-presence/>
- Jones, L. A. & Sarter, N. B. (2008). Tactile displays: guidance for their design and application. *Human Factors*, 50 (1), 90–111.
- Joseph J. LaViola, J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bull.*, 32 (1), 47–56. <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- Kaczmarek, K. A., Webster, J. G., Bach-y-Rita, P. & Tompkins, W. J. (1991). Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1109/10.68204>
- Kamin, M. & Schätzle, S. (2012, September 25). Navigation durch Vibration: VibroTac unterstützt sehbehinderte und blinde Menschen. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*. Zugriff am 5.5.2017. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-5318/#/gallery/7675
- Kammermeier, P., Buss, M. & Schmidt, G. (2001). A systems theoretical model for human perception in multimodal presence systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6 (3), 234–244. <https://doi.org/10.1109/3516.951361>
- Kellogg, R. S., Kennedy, R. S. & Graybiel, A. (1965). Motion sickness symptomatology of labyrinthine defective and normal subjects during zero gravity maneuvers. *Aerospace medicine*, 36, 315–318.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3 (3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3

- Keshavarz, B. & Hecht, H. (2011). Axis Rotation and Visually Induced Motion Sickness: The Role of Combined Roll, Pitch, and Yaw Motion. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 82 (11), 1023–1029. <https://doi.org/10.3357/ASEM.3078.2011>
- Kilteni, K., Groten, R. & Slater, M. (2012). The Sense of Embodiment in Virtual Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21 (4), 373–387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Knight, J. F. & Baber, C. (2007). Effect of Head-Mounted Displays on Posture. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49 (5), 797–807. <https://doi.org/10.1518/001872007X230172>
- Kuhl, S. A., Thompson, W. B. & Creem-Regehr, S. H. (2009). HMD calibration and its effects on distance judgments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 6 (3), 1–20. <https://doi.org/10.1145/1577755.1577762>
- Lin, M. C., Manocha, D., Cohen, J. D. & Gottschalk, S. (1996). Collision Detection: Algorithms and Applications. In J.-P. Laumond & M. Overmars (Hrsg.), *Algorithms for Robotic Motion and Manipulation* (S. 129–143). Natick, MA, USA: A. K. Peters, Ltd.
- Lo, W. T. & So, R. H. Y. (2001). Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes. *Applied Ergonomics*, 32 (1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00059-4)
- Loomis, J. M. & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. In K.R. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (Hrsg.), *Handbook of perception and human performance, Vol. 2: Cognitive processes and performance* (S. 1–41). Oxford, England: John Wiley & Sons.
- Lorenz, D. (2013). *Äußere Einflussparameter auf Sitzpositionen im Fahrzeug*. Technische Universität München. Zugriff am 22.1.2016. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1115884>
- Lorenz, S., Kaiser, R., Assmann, E., Engstler, F. & Zöllner, R. (2008). Ergonomieabsicherung im Fahrzeug mittels Mixed Reality: Beeinflussung der Sitzposition durch die Vorgehensweise bei der Sitzeinstellung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, (62), 3–14.
- Louw, S., Kappers, A. M. L. & Koenderink, J. J. (2000). Haptic detection thresholds of Gaussian profiles over the whole range of spatial scales. *Experimental Brain Research*, 132 (3), 369–374. <https://doi.org/10.1007/s002210000350>
- Lück, D. (2011). Mängel im Datensatz beseitigen. In L. Akreimi, N. Baur & S. Fromm (Hrsg.), *Datenanalyse mit SPSS für Fortgeschrittene 1* (3. Auflage, S. 339). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Verfügbar unter: <http://www.springerprofessional.de/978-3-531-93041-1---datenanalyse-mit-spss-fuer-fortgeschrittene-1/1714932.html>
- Mandel, R., Müller, A. & Maier, T. (2013). How much room for convenience? Factors contributing to perceived comfort in electric vehicles. (Band 1). Gehalten auf der 13th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, Stuttgart.

- Mania, K. & Chalmers, A. (2004). The Effects of Levels of Immersion on Memory and Presence in Virtual Environments: A Reality Centered Approach. *CyberPsychology & Behavior*, 4 (2), 247–264.
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (Beltz Pädagogik) (11., aktualisierte und überarb. Aufl.). Weinheim [u.a.]: Beltz. Verfügbar unter: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783407291424
- Moehring, M. (2013). *Realistic Interaction with Virtual Objects within Arm's Reach*. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:gbv:wim2-20130301-18592>
- Mon-Williams, M., Warm, J. P. & Rushton, S. (1993). Binocular vision in a virtual world: visual deficits following the wearing of a head-mounted display. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13 (4), 387–391. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1993.tb00496.x>
- Nash, E. B., Edwards, G. W., Thompson, J. A. & Barfield, W. (2000). A Review of Presence and Performance in Virtual Environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 12 (1), 1–41. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1201_1
- Nunez, D. (2007). *A Capacity Limited, Cognitive Constructionist Model of Virtual Presence*. Cape Town: University of Cape Town. Verfügbar unter: <http://pubs.cs.uct.ac.za/archive/00000454/>
- NVIS, Inc. (2010, August 30). New nVisor ST50. *NVIS — News*. Zugriff am 15.7.2014. Verfügbar unter: <http://nvisinc.com/news.php?id=16>
- Peck, T. C., Seinfeld, S., Aglioti, S. M. & Slater, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Consciousness and Cognition*, 22 (3), 779–787. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.04.016>
- Peer-Oliver Wagner. (2013, November 12). Der Mensch als entscheidende Zielgröße im Produktentstehungsprozess. Vortrag gehalten auf der Digital Humans in Application, Leipzig.
- Pöschl, S., Wall, K. & Döring, N. (2013). Integration of spatial sound in immersive virtual environments an experimental study on effects of spatial sound on presence (S. 129–130). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2013.6549396>
- Potka, J. (1995). Immersive training systems: Virtual reality and education and training. *Instructional Science*, 23 (5), 405–431. <https://doi.org/10.1007/bf00896880>
- Riedl, M. (2012, März 5). *Potential eines virtuellen Fahrerplatzmodells in der Fahrzeugkonzeptentwicklung*. München: Technischen Universität München.
- Ritschel, T., Dachsbacher, C., Grosch, T. & Kautz, J. (2012). The State of the Art in Interactive Global Illumination. *Comput. Graph. Forum*, 31 (1), 160–188. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2012.02093.x>
- Salisbury, K., Conti, F. & Barbagli, F. (2004). Haptic rendering: introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24 (2), 24–32. <https://doi.org/10.1109/MCG.2004.1274058>

- Sallnäs, E.-L., Rasmus-Gröhn, K. & Sjöström, C. (2000). Supporting Presence in Collaborative Environments by Haptic Force Feedback. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 7 (4), 461–476.
<https://doi.org/10.1145/365058.365086>
- Salzmann, H. & Froehlich, B. (2008). The Two-User Seating Buck: Enabling Face-to-Face Discussions of Novel Car Interface Concepts (S. 75–82). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VR.2008.4480754>
- Sanchez-Vives, M. V. & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6 (4), 332–339.
- Sarris, V. (1992). *Methodologische Grundlagen der Experimentalpsychologie. Versuchsplanung und Stadien des psychologischen Experiments*. (Bände 1-2, Band 1). München, Basel: Ernst Reinhardt.
- Schätzle, S. (2014). DLR - Institut für Robotik und Mechatronik - VibroTac. Zugriff am 19.11.2014. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabid-8753/15115_read-39366/
- Schreiber, W. & Zimmermann, P. (2011). *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld Das AVILUS-Projekt - Technologien und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Zugriff am 15.3.2014. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20636-8>
- Schuemie, M., van der Straaten, P., Krijn, M. & van der Mast, C. (2001). Research on Presence in Virtual Reality: A Survey. *Cyberpsychology and Behavior*, 4 (2), 183–201.
- Slater, M. (2003). A note on presence terminology (Band 3). Gehalten auf der Presence connect. Verfügbar unter: http://www.cs.ucl.ac.uk/research/vr/Projects/Presencia/ConsortiumPublications/ucl_cs_papers/presence-terminology.htm
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364 (1535), 3549–3557.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- Slater, M., Linakis, V., Usuh, M. & Kooper, R. (1995). Immersion, Presence, and Performance in Virtual Environments: An Experiment with Tri-Dimensional Chess. *Virtual Reality*, 72 (2), 163–172.
- Slater, M., Steed, A., McCarthy, J. & Maringelli, F. (1998). The Influence of Body Movement on Subjective Presence in Virtual Environments. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 40 (3), 469–477. <https://doi.org/10.1518/001872098779591368>
- Slater, M., Steed, A. & Usuh, M. (2013). *Being There Together: Experiments on Presence in Virtual Environments (1990s)*. Technical Report. London, UK.: Department of Computer Science, University College. Verfügbar unter: <http://publicationslist.org/data/melslater/ref-233/beingthere%202013.pdf>
- Slater, M. & Usuh, M. (1993). Presence in immersive virtual environments (S. 90–96). Gehalten auf der Proceedings of the 1993 IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, 2062420: IEEE Computer Society.
<https://doi.org/10.1109/vrais.1993.380793>

- Slater, M., Usoh, M. & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3 (2), 130–144.
- Slater, M. & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 6 (6), 603–616.
- So, R. H. & Lo, W. T. (1999). Cybersickness: an experimental study to isolate the effects of rotational scene oscillations. *Virtual Reality, 1999. Proceedings., IEEE* (S. 237–241). IEEE.
- So, R. H. Y., Ho, A. & Lo, W. T. (2001). A Metric to Quantify Virtual Scene Movement for the Study of Cybersickness: Definition, Implementation, and Verification. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10 (2), 193–215. <https://doi.org/10.1162/105474601750216803>
- Söderman, M. (2005). Virtual reality in product evaluations with potential customers: An exploratory study comparing virtual reality with conventional product representations. *Journal of Engineering Design*, 16 (3), 311–328. <https://doi.org/10.1080/09544820500128967>
- Stanney, K. M., Kennedy, R. S. & Drexler, J. M. (1997). Cybersickness is Not Simulator Sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 41 (2), 1138–1142. <https://doi.org/10.1177/107118139704100292>
- Stanney, K. M., Mourant, R. R. & Kennedy, R. S. (1998). Human Factors Issues in Virtual Environments: A Review of the Literature. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7 (4), 327–351. <https://doi.org/10.1162/105474698565767>
- Stanney, K. & Salvendy, G. (1998). Aftereffects and Sense of Presence in Virtual Environments: Formulation of a Research and Development Agenda. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10 (2), 135–187. https://doi.org/10.1207/s15327590ijhc1002_3
- Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42 (4), 73–93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
- Thomas Herpel & Peer-Oliver Wagner. (2012). Aufbau: Ergonomie und Komfort. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 379–483). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8298-1_6
- Thomke, S. & Fujimoto, T. (2000). The Effect of “Front-Loading” Problem-Solving on Product Development Performance. *Journal of Product Innovation Management*, 17 (2), 128–142. <https://doi.org/10.1111/1540-5885.1720128>
- Thompson, W. B., Willemsen, P., Gooch, A. A., Creem-Regehr, S. H., Loomis, J. M. & Beall, A. C. (2004). Does the Quality of the Computer Graphics Matter when Judging Distances in Visually Immersive Environments? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13 (5), 560–571. <https://doi.org/10.1162/1054746042545292>

- Usoh, M., Catena, E., Arman, S. & Slater, M. (2000). Using presence questionnaires in reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9 (5), 497–503.
- Van Baren, J. & IJsselsteijn, W. (2004). *Measuring presence: A guide to current measurement approaches*. Compendium No. IST-2001-39237. Information Society Technologies.
- Venturino, M. & Wells, M. J. (1990). Head Movements as a Function of Field-of-View Size on a Helmet-Mounted Display. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 34 (19), 1572–1576. <https://doi.org/10.1177/154193129003401932>
- Visell, Y. (2009). Tactile sensory substitution: Models for enaction in HCI. *Interacting with Computers*, 21 (1–2), 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.int-com.2008.08.004>
- Volkswagen AG. (2017, September 27). Unterwegs in einem Volkswagen, den es noch gar nicht gibt. *Volkswagen AG*. Zugriff am 16.6.2018. Verfügbar unter: https://www.volkswagenag.com/de/news/2017/09/virtual_concept_car.html#
- Voss, T. (2008, Juli 8). *Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen*. Dissertation. München: Technische Universität München. Verfügbar unter: <http://media-tum.ub.tum.de/doc/680301/680301.pdf>
- Wall, K., Tomaszek-Staude, W., Pöschl, S. & Döring, N. (2014). State of the art barriers in validation of digital mock-ups in immersive virtual environments. In P. Scharff & C. Weber (Hrsg.), *Shaping the Future by Engineering*. Gehalten auf der 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany.
- Wang, G. G. (2002). Definition and Review of Virtual Prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2 (3), 232. <https://doi.org/10.1115/1.1526508>
- Wann, J. P., Rushton, S. & Mon-Williams, M. (1995). Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments. *Vision Research*, 35 (19), 2731–2736. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00018-U](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00018-U)
- Weber, B., Schätzle, S., Hulin, T., Preusche, C. & Deml, B. (2011). Evaluation of a vibrotactile feedback device for spatial guidance. *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE* (S. 349–354). IEEE. Zugriff am 7.4.2016. Verfügbar unter: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5945511
- Weller, R. (2013). A Brief Overview of Collision Detection. *New Geometric Data Structures for Collision Detection and Haptics* (S. 9–46). Heidelberg: Springer International Publishing. Zugriff am 6.11.2016. Verfügbar unter: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-01020-5_2
- Widmann, U. (2012). Produktentstehungsprozess: Simultaneous Engineering und Projektmanagement im Produktentstehungsprozess. In H.-H. Braess & U. Seiffert (Hrsg.), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (S. 881–948). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8298-1_11

- Wille, M. (2016). *Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes: Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs*. No. F 2288. (S. 136). Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Verfügbar unter: <https://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/F2288-2.html>
- Wille, M., Grauel, B. & Adolph, L. (2013). Strain caused by head mounted displays. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe*, 267–277.
- Wilson, J. C. (2007). *Head-mounted displays and new technologies for fire-fighting and rescue in a post 9/11 world*. Berkeley: University of California at Berkeley.
- Youngblut, C. (2003). *Experience of Presence in Virtual Environments*. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center.
<https://doi.org/10.21236/ADA427495>
- Zachmann, G. (1998). VR-Techniques for Industrial Applications (Computer Graphics: Systems and Applications). In F. Dai (Hrsg.), *Virtual Reality for Industrial Applications* (S. 13–38). Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-46847-6_2
- Zimmermann, P. (2001). Virtual Reality - Forschung und Anwendung bei Volkswagen. Sonderheft „*Virtualisierung und Virtualität*“, *Forschungsmagazin der Technischen Universität Braunschweig* (S. 24–36). Verfügbar unter: <http://www.umi.cs.tu-bs.de/full/information/literature/sonderheft/sonderheft.html>
- Zimmermann, P. (2008). Virtual Reality Aided Design. A survey of the use of VR in automotive industry. In D. Talaba & A. Amditis (Hrsg.), *Product Engineering* (S. 277–296). Springer Netherlands. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8200-9_13

Anhang

B Übersetzte Version des Simulator-Sickness- Questionnaire

Befindlichkeitsabfrage

Anweisung: Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile an, ob und wie stark Sie gerade eines der folgenden Symptome verspüren.

Dieses Symptom verspüre ich ...	Gar nicht	Leicht	Mittelmäßig	Schwer
Allgemeines Unbehagen / Unwohlsein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ermüdung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Überanstrengung der Augen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Probleme mit der Fokussierung / Sehschärfe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Erhöhte Speichelbildung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwitzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Übelkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konzentrationschwierigkeiten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Druckgefühl im Kopf	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verschwommene Sicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwindel (bei geöffneten Augen)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schwindel (bei geschlossenen Augen)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gleichgewichtsstörungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Magenbeschwerden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufstoßen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C Studie 1 – Standardisierte Einweisung der Interviewteilnehmer

Zunächst einmal bedanke ich mich für Ihr Interesse an unserer Arbeit und Ihre Bereitschaft uns bei der Weiterentwicklung zu helfen.

Bevor es losgeht, möchte ich Sie noch über den grundsätzlichen Rahmen aufklären:

- **Inhalte der Arbeit:** Erlebbarkeit und Beurteilung von Fahrzeugen in der virtuellen Realität im Rahmen der virtuellen Gesamtfahrzeugabnahme.
- Es handelt sich um ein offenes Interview, welches durch einige Leitfragen ergänzt wird. Es steht Ihnen frei einzelne Fragen im Interview nicht zu beantworten.
- Das Interview dauert insgesamt circa 30-45 Minuten.
- Die Teilnahme am Interview ist freiwillig und es steht Ihnen frei das Interview jederzeit ohne persönlichen Nachteil abubrechen (bspw. bei Unwohlsein etc.).
- Die erhobenen Daten dienen der Weiterentwicklung der virtuellen Sitzkiste sowie der Anfertigung der Dissertation des Interviewers. Die getroffenen Aussagen werden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen nur in Ausschnitten zitiert und so verallgemeinert, dass kein Rückschluss auf einzelne Befragte mehr möglich ist.
- Das Interview wird mit Ihrer Zustimmung OHNE PERSONENBEZUG auf einem Tonträger aufgezeichnet und im Anschluss transkribiert (verschriftlicht).
Aus der Transkription der Interviews werden dann relevante Kategorien und Faktoren für die Weiterentwicklung herausgearbeitet und zusammengestellt. Diese dienen als Anhaltspunkt für die Weiterentwicklung der Sitzkiste.
Dabei werden alle Namen, Abteilungsbezeichnungen, Modellbezeichnungen usw. entfernt. Die Tonträgeraufnahmen werden nach Abschluss der Untersuchung vernichtet.
Ihre Daten werden zu jeder Zeit absolut vertraulich behandelt!
- Die gesamte Vorgehensweise wurde mit der **Kommission Datenschutz** im Vorfeld abgestimmt und von dieser genehmigt.

Haben Sie noch Fragen?

D Studie 2

D.1 Standardisierte Einweisung der Teilnehmer in den Versuchsablauf

Zunächst einmal bedanke ich mich für Ihr Interesse an unserer Arbeit und Ihre Bereitschaft, uns bei der Weiterentwicklung der Innenraumbewertung zu helfen.

Bevor es losgeht, möchte ich Sie noch über den **grundsätzlichen Rahmen aufklären**:

- **Sie sind heute hier, um bestimmte Aspekte im Innenraum eines sich noch in der Entwicklung befindenden Fahrzeugmodells zu bewerten.**
- Die Beurteilung erfolgt mithilfe von Fragebögen und besteht aus zwei Teilen. Beide Teile zusammen dauern circa 30-45 Minuten. Anschließend haben wir die Möglichkeit, in einem kurzen Nachgespräch offene Fragen zu erörtern und Anmerkungen zur Beurteilung aufzunehmen.
- Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig und es steht Ihnen frei, das Experiment jederzeit ohne persönlichen Nachteil abzubrechen (bspw. bei Unwohlsein) oder einzelne Fragen nicht zu beantworten.
- Die erhobenen Daten dienen der Verbesserung von Innenraumbewertungen in zukünftigen Fahrzeugprojekten. Die Ergebnisse werden ggf. in wissenschaftlichen Veröffentlichungen kumuliert dargestellt und so verallgemeinert, dass kein Rückschluss auf einzelne Probanden mehr möglich ist. Die Versuchsdurchführung wurde mit dem **Probandenpool** im Vorfeld abgestimmt.
- **IHRE DATEN WERDEN ZU JEDER ZEIT ABSOLUT VERTRAULICH BEHANDelt!**

HABEN SIE NOCH FRAGEN?

GANZ WICHTIG: BITTE SCHALTEN SIE ZUNÄCHST IHR TELEFON AUS.

- Wir beginnen auf der Fahrerposition und wechseln später in die zweite Sitzreihe auf der Beifahrerseite. Hierzu gibt es eine entsprechende Aufforderung im Fragebogen.
- Setzen Sie sich bitte zunächst in den Sitz und stellen Sie sich den Sitz und das Lenkrad bequem ein, als würden Sie mit dem Fahrzeug losfahren wollen.
- Sollten Sie Fragen zur Formulierung oder Verständnis einer Frage haben, geben Sie bitte dem Versuchsleiter Bescheid.
- Wenn Sie eine Bewertung nachträglich korrigieren möchten, malen Sie bitte das alte Kästchen vollständig aus, und ein leeres Kästchen daneben. Machen Sie anschließend Ihre neue Bewertung.

D.2 Index Erreichbarkeit von Bedienelementen

- **Erfasst:** Die Erreichbarkeiten von Bedienelementen im Untersuchten Fahrzeuginnenraum.
- **Anzahl der Items:** 14
- **Wertebereich:** 0–5
- **Interne Konsistenz:** Cronbachs $\alpha = .721$
- **Items:**
 - [fz17b]** Erreichbarkeit des Zuziehgriffs der Fahrertür vom Fahrerplatz
(5) sehr gut erreichbar - (0) sehr schlecht erreichbar
 - [fz17a]** Erreichbarkeit der Bedienelemente des Infotainment-Systems vom Fahrerplatz
(5) sehr gut erreichbar - (0) sehr schlecht erreichbar
 - [fz16d]** Ablagen VORNE (Tür und Mittelkonsole) - Erreichbarkeit
(5) bequem zu erreichen - (0) umständlich zu erreichen
 - [fz17c]** Erreichbarkeit des Zuziehgriffs der Beifahrertür vom Fahrerplatz
(5) sehr gut erreichbar - (0) sehr schlecht erreichbar
 - [fz17d]** Erreichbarkeit des Anschnallgurts vom Fahrerplatz
(5) sehr gut erreichbar - (0) sehr schlecht erreichbar
 - [fz17e]** Erreichbarkeit des Handschuhfachgriffs vom Fahrerplatz
(5) sehr gut erreichbar - (0) sehr schlecht erreichbar
 - [fz25a]** Die Cupholder VORNE sind
(5) bequem zu bedienen - (0) unbequem zu bedienen
 - [fz28]** Die Position/Lage des Infotainment-Displays ist ergonomisch angenehm
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz29]** Die Position/Lage der Gangschaltung/Wählbetätigung ist ergonomisch angenehm
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz30]** Die Position/Lage der Fensterheberschalter ist ergonomisch angenehm
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz31]** Die Position/Lage der elektronischen Parkbremse (EPB-Schalter) ist ergonomisch angenehm (5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz33]** Die Position/Lage des Klimabedienteils ist ergonomisch angenehm
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz51]** Die Position/Lage der Mantelhaken ist ergonomisch angenehm
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz53]** Der Anschnallgurt HINTEN ist gut erreichbar
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu

D.3 Index Sicht nach außen

- **Erfasst:** Beurteilung der Sicht nach außen unter Berücksichtigung von Sichtverdeckungen.
- **Anzahl der Items:** 14
- **Wertebereich:** 0–5
- **Interne Konsistenz:** Cronbachs $\alpha = .764$
- **Items:**
 - [fz8a] Die Sicht nach vorne wird - vom Dachrahmen
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz8b] Die Sicht nach vorne wird - den A,B-Säulen
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz8d] Die Sicht nach vorne wird - durch die Größe der Windschutzscheibe
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz8e] Die Sicht nach vorne wird - vom Spiegelmodul
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz8f] Die Sicht nach vorne wird - der ausgeklappten Sonnenblende
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz12a] Die Sicht nach hinten wird - vom Dachrahmen
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz12b] Die Sicht nach hinten wird - den B-,C-Säulen
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz12d] Die Sicht nach hinten wird - durch die Fenstergröße
(5) gar nicht eingeschränkt - (0) sehr stark eingeschränkt
 - [fz36a] Ein hinter dem Fahrzeug fahrendes Fahrzeug wäre - im Innenspiegel
(5) sehr gut sichtbar - (0) sehr schlecht sichtbar
 - [fz36b] Ein hinter dem Fahrzeug fahrendes Fahrzeug wäre - beim Blick nach hinten
(5) sehr gut sichtbar - (0) sehr schlecht sichtbar
 - [fz39] Der Außenspiegel bietet ein ausreichend großes Sichtfeld
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz41] Der Innenspiegel bietet ein ausreichend großes Sichtfeld
(5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz13] Die Rundumsicht nach außen bewerte ich insgesamt als
(5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz35] Die äußeren Abmessungen des Fahrzeugs sind für mich
(5) gut erkennbar - (0) schlecht erkennbar

D.4 Index Raumgefühl

- **Erfasst:** Subjektive Beurteilung der Realitätsnähe des virtuellen Fahrzeugs.
- **Anzahl der Items:** 18
- **Wertebereich:** 0–5
- **Interne Konsistenz:** Cronbachs $\alpha = .819$
- **Items:**
 - [fz3a] Bei geschlossener Tür bewerte ich die Kopffreiheit VORNE LINKS als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz3b] Bei geschlossener Tür bewerte ich die Kopffreiheit VORNE LINKS als (5) geräumig - (0) sehr eng
 - [fz4g] Der Innenraum in der vorderen Sitzreihe wirkt auf mich (5) hell - (0) dunkel
 - [fz4h] Der Innenraum in der vorderen Sitzreihe wirkt auf mich (5) warm - (0) kalt
 - [fz4i] Der Innenraum in der vorderen Sitzreihe wirkt auf mich (5) geräumig - (0) eng
 - [fz6] Die Größe des Seitenfensters bewerte ich als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz20] Das Lenkrad bietet nach der Einstellung genug Freiraum für meine Beine (auch bei der Betätigung der Pedalerie) (5) stimme zu - (0) stimme nicht zu
 - [fz26a] Die Bewegungsfreiheit VORNE LINKS im Bereich der Arme und des Oberkörpers bewerte ich als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz26b] Die Bewegungsfreiheit VORNE LINKS im Bereich der Arme und des Oberkörpers bewerte ich als (5) geräumig - (0) eng
 - [fz45] Bei geöffneter Tür bewerte ich die Größe der Türöffnung HINTEN RECHTS als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz46a] Bei geschlossener Tür bewerte ich die Kopffreiheit HINTEN RECHTS als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz46b] Bei geschlossener Tür bewerte ich die Kopffreiheit HINTEN RECHTS als (5) geräumig - (0) eng
 - [fz47g] Der Innenraum im Fond wirkt auf mich (5) hell - (0) dunkel
 - [fz47h] Der Innenraum im Fond wirkt auf mich (5) warm - (0) kalt
 - [fz47i] Der Innenraum im Fond wirkt auf mich (5) geräumig - (0) eng
 - [fz48] Die Größe des Seitenfensters HINTEN RECHTS bewerte ich als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz57a] Die Bewegungsfreiheit HINTEN RECHTS im Bereich der Arme und des Oberkörpers bewerte ich als (5) sehr gut - (0) sehr schlecht
 - [fz57b] Die Bewegungsfreiheit HINTEN RECHTS im Bereich der Arme und des Oberkörpers bewerte ich als (5) geräumig - (0) eng

E Studie 3

E.1 Standardisierte Einweisung der Teilnehmer in den Versuchsablauf

Zunächst einmal bedanke ich mich für Ihr Interesse an unserer Arbeit und Ihre Bereitschaft, uns bei der Weiterentwicklung der Innenraumbewertung zu helfen.

Bevor es losgeht, möchte ich Sie noch über den **grundsätzlichen Rahmen aufklären**:

- **Sie sind heute hier, um bestimmte Aspekte im Innenraum eines sich in der Entwicklung befindenden Fahrzeugmodells zu bewerten.**
- Die Beurteilung erfolgt in der virtuellen Sitzkiste mithilfe von Fragebögen und besteht aus zwei Teilen. Beide Teile zusammen dauern circa 30-45 Minuten. Anschließend haben wir die Möglichkeit, in einem kurzen Nachgespräch offene Fragen zu erörtern und Anmerkungen zur Beurteilung aufzunehmen.
- Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig und es steht Ihnen frei, das Experiment jederzeit ohne persönlichen Nachteil abzubrechen (bspw. bei Unwohlsein) oder einzelne Fragen nicht zu beantworten.
- Die erhobenen Daten dienen der Verbesserung von Innenraumbewertungen in zukünftigen Fahrzeugprojekten. Die Ergebnisse werden ggf. in wissenschaftlichen Veröffentlichungen kumuliert dargestellt und so verallgemeinert, dass kein Rückschluss auf einzelne Teilnehmer mehr möglich ist. Die Versuchsdurchführung wurde mit dem **Probandenpool** im Vorfeld abgestimmt.
- **IHRE DATEN WERDEN ZU JEDER ZEIT ABSOLUT VERTRAULICH UND ANONYM BEHANDELT!**

HABEN SIE DAZU FRAGEN?

- **GANZ WICHTIG: BITTE SCHALTEN SIE ZUNÄCHST IHR TELEFON AUS ODER SCHALTEN SIE ES STUMM UND LASSEN ES AM TISCH LIEGEN.**
- **BITTE LEGEN SIE SOFERN VORHANDEN IHRE ARMBANDUHR / ARMBÄNDER, WENN MÖGLICH AB UND LASSEN DIESE AM TISCH LIEGEN.**
- Bitte füllen Sie als erstes diesen Fragebogen zur Ihrer aktuellen Befindlichkeit aus.
- Lassen Sie bitte im Schluss den Fragebogen sowie ihre persönlichen Sachen auf dem Tisch liegen und folgen Sie mir bitte zur virtuellen Sitzkiste

E.2 Standardisierte Einweisung der Teilnehmer in die Versuchsanordnung

Bitte stellen Sie sich den Sitz so ein, dass Sie die Pedale und das Lenkrad bequem erreichen und bedienen können.

Sie sollen gleich einen virtuellen Fahrzeuginnenraum bewerten und bekommen dazu von mir ein Head-Mounted-Display, kurz HMD aufgesetzt. Dieses Display schirmt Sie von der Versuchsumgebung ab und versetzt Sie in das virtuelle Fahrzeug. Gleichzeitig ergeben Sie sich für die Untersuchung zwei wichtige Aspekte, die ich Ihnen gerne erläutern würde: **Während Sie das HMD tragen**, werden Sie den Fragebogen nicht sehen können, mit dem Sie das Fahrzeug bewerten sollen. Deshalb werde ich Ihnen die Fragen und Antworten vorlesen und Sie sagen mir wo auf der jeweiligen Skala ich das Kreuzchen für Sie setzen darf.

→ Ich zeige Ihnen zunächst einmal den Fragebogen, damit Sie sehen wie er aufgeraut ist. Die Bewertung erfolgt auf einer 6-stufigen Skala mit je nach Frage unterschiedlichen Skaleneckpunkten. Es geht dabei immer um ihre eigene individuelle Wahrnehmung bzw. Einschätzung. Sollten Sie Fragen zur Formulierung oder zum Verständnis einer Frage haben, geben Sie mir bitte Bescheid.

Der zweite wichtige Aspekt bei der Verwendung des HMDs ist, dass Sie ihren eigenen Körper in der virtuellen Darstellung nicht sehen werden. Deshalb bekommen Sie von mir Hilfsmittel an die Hand, mit denen Sie sich orientieren und die Bewertungen durchführen können.

→ Wir beginnen mit dem so genannten Pointer. Es handelt sich dabei, um ein Zeigegerät, den Sie so in die Hand nehmen, dass ihre Zeigefingerkuppe auf der Spitze des Pointers anliegt (DEMO). Die Position des Pointers wird von einem Trackingsystem erfasst und in das virtuelle Fahrzeug übertragen. Dort sehen Sie eine virtuelle Version des Pointers (DEMO). Die Position der physikalischen Spitze entspricht dabei der Position der virtuellen Pointerspitze. Damit haben Sie also eine Referenz für ihren Zeigefinger. Die virtuelle Pointerspitze kann in das virtuelle Fahrzeug eintauchen (DEMO). Wenn die Pointerspitze so eintaucht (DEMO) haben Sie mir ihrem Zeigefinger diese Fläche virtuell berührt. Sie können den Pointer jederzeit von der einen Hand in die andere nehmen, so wie es ihnen gerade als natürlicher vorkommt.

→ Als nächstes bekommen Sie von mir zwei Armbänder. Deren Position und Ausrichtung wird ebenso in das virtuelle Fahrzeug übertragen.

Nur Gruppe VISU + KOMBI: Wie Sie sehen, werden die Armbänder als halbtransparente virtuelle Manschetten dargestellt. Wenn sie damit eine Fläche berühren, können Sie eine Schnittfläche sehen (DEMO).

Nur Gruppe VIBRO + KOMBI: Die Armbänder enthalten in den Zwischensegmenten Vibrationsmotoren (DEMO). Wenn Sie damit eine virtuelle Fläche berühren, spüren Sie eine Vibration an der entsprechenden Stelle des Handgelenks (DEMO). Die Vibrationsrückmeldung ist richtungsabhängig, sie spüren Sie immer dort wo ihr Handgelenk mit dem Innenraum kollidiert (DEMO). Weiterhin ist die Spitze des Pointers ebenfalls ein Auslöser. Wenn Sie also etwas mit der Pointerspitze berühren, vibriert es am entsprechenden Armband, an der Hand in der Sie den Pointer halten (DEMO).

→ Nun kommen wir zum HMD. Es hat auf der Vorderseite zwei kleine Monitore, mit denen ein Stereoskopisches Bild erzeugt wird. Zusätzlich berechnet der Computer aus ihrer Kopfposition die passende Perspektive. Sie können sich also jederzeit im Fahrzeug umsehen (DEMO). Das HMD hat hinten ein Kabel. Sollte dieses sich am Sitz verhaken und das Display infolgedessen schief sitzen oder andere Störungen auftreten, geben Sie mir bitte Bescheid. Ich werde ihnen das Display jetzt aufsetzen, Sie stützen es bitte vorne mit beiden Händen ab und ich stelle Ihnen die Halterung individuell ein. **Bei Brillenträgern:** Das HMD ist für Brillenträger geeignet. Sollte ihnen die Darstellung jedoch komisch vorkommen, geben Sie mir bitte Bescheid. Bitte helfen Sie gleich beim Aufsetzen zusätzlich indem Sie die Filzverblendung mit ihren Fingern selbstständig über Ihre Brille ziehen.

→ Als kleine Übung berühren Sie bitte für mich mit dem Pointer in der rechten Hand den virtuellen Innenspiegel bis Sie ihn erreichen.

Und legen Sie bitte den linken Arm auf die virtuelle Armauflage der Fahrertür ab, bis er aufliegt.

→ Haben Sie das Funktionsprinzip verstanden? Haben Sie irgendwelche anderen Fragen? Sollen wir mit der Bewertung beginnen?

E.3 Index Realitätsnähe

- **Erfasst:** Subjektive Beurteilung der Realitätsnähe des virtuellen Fahrzeugs.
- **Anzahl der Items:** 10
- **Wertebereich:** 0–5
- **Interne Konsistenz:** Cronbachs $\alpha = .852$
- **Items:**
 - [m1a]** Wie stark hatten Sie während der Beurteilung das Gefühl in einem normalen Fahrzeug zu sitzen?
 - [m2a]** Die Darstellung des Fahrzeuginnenraums wirkte insgesamt (0 künstlich - 5 realistisch)
 - [m2b]** Die Darstellung des Fahrzeuginnenraums wirkte insgesamt (0 reduziert - 5 detailliert)
 - [m2c]** Die Darstellung des Fahrzeuginnenraums wirkte insgesamt (0 minderwertig - 5 hochwertig)
 - [m16]** Ich konnte mir einen guten räumlichen Eindruck vom späteren Serienfahrzeug verschaffen (0 stimme nicht zu - 5 stimme zu)
 - [m17]** Die Proportionen des Innenraums wirkten (0 unrealistisch - 5 realistisch)
 - [m_n11]** Die Entfernungen im Innenraums wirkten (0 unrealistisch - 5 realistisch)
 - [m_n18a]** Die Umgebung, in der sich das Fahrzeug während der Beurteilung befand, wirkte auf mich (0 künstlich - 5 realistisch)
 - [m35]** Wie sehr ähnelt diese Innenraumbewertung der Bewertung vor einem Autokauf? (0 unterschiedlich - 5 identisch)
 - [m36]** Diese Art der Innenraumdarstellung eignet sich gut für Bewertungen aus Kundensicht? (0 stimme nicht zu - 5 stimme zu)

E.4 Index Eignung für haptische Bewertung

- **Erfasst:** Die empfundene Eignung des Kollisionsfeedbacks bei der Beurteilung von haptischen Eigenschaften eines Fahrzeuginnenraums.
- **Anzahl der Items:** 4
- **Wertebereich:** 0–5
- **Interne Konsistenz:** Cronbachs $\alpha = .748$
- **Items:**

[m27] Insgesamt war mir die Beurteilung der Erreichbarkeiten im Innenraum (bspw. von Anschnallgurt, Türgriff, Handschuhfachgriff)

(0) sehr gut möglich – (5) sehr schlecht möglich

[m_n5] Insgesamt war mir die Beurteilung der Armauflagen)

(0) sehr gut möglich – (5) sehr schlecht möglich

[m_n10] Insgesamt war mir die Beurteilung der Freigänge im Innenraum (bspw. zwischen Sitzverstellung und Tür, zwischen Innenspiegel und Dachhimmel, Abstand von Kopf zum Dachhimmel)

(0) sehr gut möglich – (5) sehr schlecht möglich

[m_n13] Insgesamt war mir die Beurteilung der Bewegungsfreiheit im Innenraum (im Bereich der Arme und des Oberkörpers, Abstand von Kopf zum Dachhimmel)

(0) sehr gut möglich – (5) sehr schlecht möglich