

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**  
**Lehrstuhl für Ergonomie**

# **Potential eines virtuellen Fahrerplatzmodells in der Fahrzeugkonzeptentwicklung**

**Michael Riedl**

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

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb, i.R.  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Die Dissertation wurde am 05.09.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.03.2012 angenommen.



*- Ein Problem wird nicht im Computer gelöst, sondern in irgendeinem Kopf. Die ganze Apparatur dient nur dazu, diesen Kopf so weit zu drehen, dass er die Dinge richtig und vollständig sieht. -*

*[Charles F. Kettering]*



# Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Bubb, der durch seine Betreuung und durch seinen fachlichen Rat diese Arbeit erst ermöglicht hat. Ferner möchte ich Herrn Professor Günthner für die Übernahme des Koreferats und Herrn Professor Bengler für die Leitung der Prüfungskommission danken.

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung Entwicklung Ergonomiekonzepte bei der AUDI AG in Ingolstadt. In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank Dr. Marcus Schneid für die vielen inspirierenden Gespräche und fachlichen Diskussionen zu dieser Arbeit. Weiterhin bedanke ich mich an dieser Stelle bei allen Kolleginnen und Kollegen, die mich bei meiner Arbeit unterstützt und die mir hilfreich zur Seite gestanden haben.

Aus dem großen Kreis der Kollegen möchte ich besonders Christoph Frandrup, Bert Grollmann, Daniel Lorenz und Christiane Bergk dankend hervorheben. Ohne sie wäre diese Arbeit sicherlich nicht in dieser Fassung zustande gekommen.

Der größte Dank kommt meiner Familie zu, insbesondere meiner Frau Katrin sowie meinen Eltern, die ihren Teil zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben und mir während meiner Promotionszeit stets den Rücken frei gehalten haben.



# Abstract

## Deutsch:

Das virtuelle Fahrerplatzmodell ist ein immersives VR-Werkzeug zur ergonomischen Konzipierung eines Fahrzeuginterieurs. Es stellt die Kombination einer visuellen Simulation mit einer ausgeprägten haptischen Rückmeldung in Form eines variablen Fahrerplatzmodells dar. Neben dem Ersatz realer physischer Modelle erweitert das virtuelle Fahrerplatzmodell die Untersuchungsumfänge konventioneller CAD-Methoden. Inhalt der Arbeit sind Aufbau, Evaluierung und Weiterentwicklung des virtuellen Fahrerplatzmodells. Es werden die zentralen Anforderungen an den Aufbau eines derartigen Mixed-Reality-Systems hergeleitet, die sich einerseits aus dem Einsatzgebiet in der ergonomischen Auslegung und Analyse eines Fahrzeuginterieurs ableiten, andererseits in der menschlichen Wahrnehmung begründet sind. Bei der Evaluierung des virtuellen Fahrerplatzmodells wird in mehreren experimentellen Studien gezeigt, dass sowohl die Sitzposition und Fahrhaltung des Anwenders in der Simulationsumgebung denen aus einem realen Fahrzeug entsprechen als auch dass durch eine digitale Repräsentation des Anwenders in der virtuellen Umgebung die durch die Visualisierung verursachten Wahrnehmungsverzerrungen hinsichtlich der Größe der dargestellten Inhalte signifikant verringert werden. Darüber hinaus wird experimentell nachgewiesen, dass für ergonomische Untersuchungen zur Erreichbarkeit und Bedienbarkeit von Bedienelementen aus dem Fahrzeuginnenraum eine ausgeprägte haptische Rückmeldung notwendig ist. Diese Erkenntnisse bestätigen den Ansatz des vorgestellten Mixed-Reality-Systems. Zusätzlich wird die Methodik der Perzentilsimulation vorgestellt. Ziel dieser neuartigen Simulationsmethodik ist es, den Anwender in die Perspektive eines beliebigen Körperperzentils hinein zu versetzen und ihn einen virtuellen Fahrzeuginnenraum aus genau dieser Perspektive erleben zu lassen. In virtuellen Umgebungen ist es unter Einsatz visueller und haptischer Stimuli möglich den Anwender in einen virtuellen Körper hineinzusetzen, den er als seinen eigenen Körper wahrnimmt und akzeptiert. Der Ansatz der Perzentilsimulation nutzt dabei die technischen Möglichkeiten, die das virtuelle Fahrerplatzmodell in Form von visueller und haptischer Simulation, sowie des eingesetzten digitalen Menschmodells bietet.

**English:**

The subject of this thesis is the design, validation and further development of a mixed-reality car model as a method in the product development process regarding ergonomic interior concepts. Consisting of a visual simulation in addition to a distinctive haptic feedback realized by a variable hardware model this mixed-reality system enlarges the scope of analysis featured by conventional CAD methods. Essential requirements for this tool are discussed including issues of human perception and ergonomic design and analysis of a car's interior. To validate the mixed-reality car model multiple experimental studies confirm that seating positions and driver postures match in reality and in mixed-reality as well as the prevention of distortion in perception of size caused by the visualization via the used Head-Mounted Display. Part and parcel of the validation is a further experimental study attesting the importance of distinctive haptic feedback as an important part of the simulation and a precondition for analysis and discussion of ergonomic issues, regarding reachability and usability of elements. Additionally, the method of percentile simulation is introduced, a further development of the mixed-reality system, targeting to put oneself in someone else's perspective to experience the interior of a car. The percentile simulation uses visual and haptic stimuli, offered by the mixed-reality car model, plus a special application of a digital human model.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Vorgehensweise und Methodik . . . . .	2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b>	<b>7</b>
2.1 Virtuelle Realität in der Fahrzeugentwicklung . . . . .	7
2.1.1 Grundlagen: Virtual Reality , Augmented Reality und Mixed Reality	7
2.1.2 Virtuelle Realität in den frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung	10
2.2 Ergonomie Konzeptentwicklung - Beschreibung des Einsatzgebietes . . .	13
2.2.1 Grundlagen der ergonomischen Konzeptauslegung eines Fahrzeugs	13
2.2.2 Potential virtueller Methoden im Bereich der Ergonomie Konzept-	
entwicklung . . . . .	14
2.3 Beschreibung des Gesamtsystems Virtuelles Fahrerplatzmodell . . . . .	18
2.3.1 Multisensorische Reize . . . . .	18
2.3.2 Grundsätzlicher Aufbau eines Virtual Reality Systems . . . . .	30
2.3.3 Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells . . . . .	41
<b>3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells</b>	<b>45</b>
3.1 Versuch zur Größenwahrnehmung . . . . .	46
3.1.1 Vergleichbare Studien . . . . .	48
3.1.2 Ableitung des Versuchskonzepts . . . . .	49
3.1.3 Versuchsbeschreibung . . . . .	50
3.1.4 Versuchsergebnisse . . . . .	53
3.2 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien . . . . .	59
3.2.1 Vergleichbare Studien . . . . .	59
3.2.2 Ableitung des Versuchskonzepts . . . . .	61
3.2.3 Versuchsbeschreibung - Details zu Durchführung und Auswertung	66
3.2.4 Versuchsergebnisse . . . . .	69
3.3 Entnahmebewegungen in virtuellen und realen Umgebungen . . . . .	81
3.3.1 Ableitung des Versuchskonzepts und Versuchsbeschreibung . . . . .	81

3.3.2	Versuchsergebnisse . . . . .	84
3.4	Sitzposition im Fahrzeug . . . . .	87
3.4.1	Vergleichbare Studien und Ableitung des Versuchskonzepts . . . . .	87
3.4.2	Versuchsbeschreibung . . . . .	89
3.4.3	Versuchsergebnisse . . . . .	90
3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells . . . . .	101
<b>4</b>	<b>Perzentilsimulation im Virtuellen Fahrerplatzmodell</b>	<b>105</b>
4.1	Theoretischer Ansatz . . . . .	106
4.2	Umsetzung im Virtuellen Fahrerplatzmodell . . . . .	110
4.3	Evaluierung der Perzentilsimulation . . . . .	115
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>123</b>
5.1	Zentrale Ergebnisse der Arbeit . . . . .	123
5.2	Ausblick und zukünftige Entwicklungen . . . . .	126
<b>Literatur</b>		<b>128</b>
<b>Anhang</b>		<b>139</b>
A.1	Versuch zur Größenwahrnehmung - Fragebogen . . . . .	139
A.2	Versuch zur Größenwahrnehmung - Auswertung . . . . .	143
A.3	Versuch zur Größenwahrnehmung - Ergebnis zur Präsenzbefragung . . . . .	145
B.1	Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Fragebogen . . . . .	146
B.2	Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Auswertung . . . . .	149
B.3	Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Probandenverteilung . . . . .	151
B.4	Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Übersicht der installierten Gestaltungsmängel . . . . .	152
B.5	Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Übersicht zum Versuchsablauf . . . . .	153
B.6	Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Ergebnis zur Präsenzbefragung . . . . .	160
C.1	Untersuchung zur Sitzposition im Fahrzeug - Fragebogen . . . . .	161
C.2	Untersuchung zur Sitzposition im Fahrzeug - Auswertung . . . . .	162
D.1	Studie zur Perzentilsimulation - Auswertung . . . . .	163
D.2	Studie zur Perzentilsimulation - Ergebnis zur Präsenzbefragung . . . . .	165
D.3	Ergebnis zur Präsenzbefragung in den durchgeführten Untersuchungen . . . . .	165

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Wirkgefüge zwischen Nutzer, Umwelt und VR-System (angelehnt an Schmidtke, 1993) . . . . .	9
Abb. 2.2	Schematische Darstellung unterschiedlicher Abstufungen zwischen Realität und virtueller Realität (angelehnt an Milgram u. a., 1995) . . . . .	10
Abb. 2.3	Auslegungswerkzeuge für die Ergonomie im Fahrzeuginnenraum. Links: Bewegliche Ergonomieschablone (Schrader, 2003), Mitte: digitales Menschmodell Ramsis (Seidl, 2011) und rechts: 1:1-Modell des Fahrzeuginnenraums (Schrader, 2003) . . . . .	14
Abb. 2.4	Aufbauten physischer Sitzkisten. Links: variable Sitzkiste (nach Richards u. Bhise, 2004), Mitte und rechts: abstrahierte Sitzkistenbauten für VR-Anwendungen (nach Schrader, 2003; Voß, 2008) . . . . .	16
Abb. 2.5	Effiziente Entwicklung durch konsequenten Einsatz von Simulationsmethoden im Entwicklungsprozess nach Sisca u. a. (2008) . . . . .	17
Abb. 2.6	Anatomischer Aufbau des menschlichen Auges (angelehnt an Becker, 2010) . . . . .	19
Abb. 2.7	Binokulare Disparität und positive sowie negative Parallaxe . . . . .	22
Abb. 2.8	Entfernungsabhängige Wahrnehmungsschwellen der Informationsquellen zur Tiefenwahrnehmung im direkten, überwiegend haptisch erreichbaren Einflussbereich (angelehnt an Cutting u. Vishton, 1995). $D_1$ und $D_2$ sind hierbei die Entfernungen zu den beiden zu vergleichenden Objekten. Die normierte ordinale Wahrnehmungsschwelle errechnet sich aus der Differenz der beiden Abstände $D_1$ und $D_2$ im Verhältnis zum mittleren Abstand . . . . .	25
Abb. 2.9	Größen-Entfernungs-Invarianzeffekt: Gleichbleibende Größe der Netzhautabbildung bei Objekten unterschiedlicher Größe und Entfernung mit konstantem Sehwinkel . . . . .	26
Abb. 2.10	Anatomischer Aufbau der menschlichen Haut (angelehnt an Sadava u. a., 2007) . . . . .	27
Abb. 2.11	Physikalische Objekteigenschaften, die vom visuellen oder haptischen rezeptuellen System wahrgenommen werden können (angelehnt an Ernst, 2001). . . . .	28
Abb. 2.12	Sichtbereich des Menschen nach DIN 15996 (2006) und exemplarisches FoV eines HMD vom Typ Rockwell Collins ProView SR80-A (Rockwell-Collins, Inc., 2010) . . . . .	32

Abb. 2.13	Aufbau einer CAVE <sup>TM</sup> nach Araki u. a. (2007)(links), Head-Mounted Display ProView SR80-A von Rockwell Collins (rechts) . . . . .	34
Abb. 2.14	Verschiedene haptische Displays. Von links nach rechts: taktiles Feedback an den Fingerkuppen mittels Druck und Vibration (nach Zürl u. Weiß, 2008a), Exoskelett zur Krafrückkopplung für die Finger (nach Yazadi, 2010), Krafrückkopplungssystem mit Handgriff (nach Haption, 2010), Exoskelett zur Krafrückkopplung für Schulter, Ellbogen und Handgelenk (nach Roosen, 2010) . . . . .	36
Abb. 2.15	Mechanische Positionierungssysteme. Links und Mitte: Binocular Omni-Orientation Monitor der Fa. Fakespace. Rechts: Virtual Car Display Aufbau von Art+Com (Vuylsteker, 2004; Waterworth, 1999) . . . . .	38
Abb. 2.16	Optische Positionierungssysteme. Links: Funktionsweise eines Infrarot-trackingsystems mit passiven Markern. Mitte: Passive Infrarottargets für Motion Capturing (beide Zürl u. Weiß, 2008b). Rechts: Marker für ein videobasiertes Trackingverfahren . . . . .	39
Abb. 2.17	Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells: Kombination der VR-Visualisierung über ein Head-Mounted Display mit einem variablen Ergonomieprüfstand . . . . .	42
Abb. 2.18	Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells: das Fahrerplatz-Mockup zur haptischen Rückmeldung . . . . .	43
Abb. 3.1	Bausteine der Validierung . . . . .	45
Abb. 3.2	Unterschätzung der Größe eines virtuell dargestellten Objekts . . . . .	47
Abb. 3.3	Schematischer Aufbau des Versuchskonzepts . . . . .	51
Abb. 3.4	Die beim sequentiellen Größenvergleich verwendeten Referenz- bzw. Vergleichskörper: realer Quader (links), die verwendeten realen Skalierungsstufen des Quaders (Mitte) und das reale 1:1-Modell des Fahrzeuginnenraums (rechts) . . . . .	54
Abb. 3.5	Ergebnisse aus den Versuchsteilen I (links), II (Mitte) und IV (rechts): mittlere Größenwahrnehmung des Vergleichskörpers, mittlerer Fehler und Irrtumswahrscheinlichkeiten für errechnete Mittelwertsunterschiede aus T-Test (graphisch zusätzlich: Median, Quartile, sowie minimale und maximale Werte) . . . . .	55
Abb. 3.6	Ergebnisse aus Versuchsteil III: Versuchsgruppe ohne Handrepräsentation (links) und Versuchsgruppe mit Handrepräsentation (rechts). Dargestellt sind mittlere Größenwahrnehmung des Fahrzeuginnenraums, mittlerer Fehler und Irrtumswahrscheinlichkeit für errechnete Mittelwertsunterschiede aus T-Test (graphisch zusätzlich: Median, Quartile, sowie minimale und maximale Werte) . . . . .	57
Abb. 3.7	Vergleich der Ergebnisse zur Größenwahrnehmung im virtuellen Fahrerplatzmodell bezüglich des Referenzkörpers (Quader bzw. Fahrzeuginterieur) und der Körperrepräsentation (mit bzw. ohne Handrepräsentation)	58

Abb. 3.8	Übersicht der Untersuchungsobjekte als sinnvolle Schnittmenge aus Anzeigen, Bedienelementen und Ablagen im Fahrzeuginterieur und den ergonomischen Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit . . . . .	63
Abb. 3.9	Greifbereiche des Menschen nach DIN 15996 (2006) . . . . .	65
Abb. 3.10	Installierte Gestaltungsmängel am Lenkrad. Auffindbarkeit: Verdeckung des Komidisplays und des Blinkerhebels. Erreichbarkeit: Erreichbarkeit der Drehsteller auf dem Lenkrad mit dem Daumen bei Umfassung des Lenkradkranzes. Reales Modell (links) und virtuelles Fahrerplatzmodell (rechts) . . . . .	67
Abb. 3.11	Installierte Gestaltungsmängel an der Handbremse. Bedienbarkeit: Umfassen des Griffs nicht möglich. Reales Modell (links) und virtuelles Fahrerplatzmodell (rechts) . . . . .	68
Abb. 3.12	Anteil richtiger und falscher Antworten . . . . .	70
Abb. 3.13	Komplexitätsgrad der ergonomischen Bewertungskriterien . . . . .	70
Abb. 3.14	Anteil richtiger und falscher Antworten beim Bewertungskriterium Auffindbarkeit . . . . .	72
Abb. 3.15	Anteil Treffer, Verpasser, korrekte Zurückweisung und falscher Alarm beim Bewertungskriterium Auffindbarkeit . . . . .	72
Abb. 3.16	Anteil richtiger und falscher Antworten beim Bewertungskriterium Erreichbarkeit . . . . .	73
Abb. 3.17	Anteil Treffer, Verpasser, korrekte Zurückweisung und falscher Alarm beim Bewertungskriterium Erreichbarkeit . . . . .	74
Abb. 3.18	Position der Stellteile Handschuhkastenöffner (HSK), Lautstärkeregler (LSR) und Außenspiegelverstellung (ASV) im Bezug auf die Greifbereiche des Probanden und dessen durch das HMD eingeschränkte Sichtfeld	75
Abb. 3.19	Anteil richtiger und falscher Antworten beim Bewertungskriterium Bedienbarkeit . . . . .	76
Abb. 3.20	Anteil Treffer, Verpasser, korrekte Zurückweisung und falscher Alarm beim Bewertungskriterium Bedienbarkeit . . . . .	77
Abb. 3.21	Abweichung verschiedener Handhaltungen zwischen realer Hand und virtuellem Modell . . . . .	78
Abb. 3.22	Mittelwert der Entscheidungszeit mit Standardabweichung entsprechend den Antwortkategorien der Signalentdeckungstheorie . . . . .	79
Abb. 3.23	Kollisionskontrolle: Farbinterpolation abhängig vom Überschneidungsgrad der kollidierenden Objekte . . . . .	81
Abb. 3.24	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus: Entnahme eines Bechers aus dem linken und rechten Becherhalter . . . . .	82
Abb. 3.25	Aufzeichnen der Entnahmekurven mittels Trackingsystem und Importieren der Kurven in Catia V5 DMU Fittings . . . . .	83
Abb. 3.26	Exemplarische Darstellung des minimalen Abstands zwischen Störkontur und Hüllkurve als kritische Stelle bei der Entnahme des Bechers . . . . .	84

Abb. 3.27	Vergleich der Bewegungskurven des linken und rechten Cups im realen Modell und im virtuellen Fahrerplatzmodell: minimaler Abstand zwischen Becher und Schalttafel bei Entnahme aus der linken bzw. rechten Aufnahme, gemittelt für die einzelnen Probanden . . . . .	85
Abb. 3.28	Positionierungsdaten der Augpunkte der Probanden aus Versuchsreihe I (Gewicht) und Versuchsreihe II (FoV+Gewicht) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	91
Abb. 3.29	Positionierungsdaten der H-Punkte der Probanden aus Versuchsreihe I (Gewicht) und Versuchsreihe II (FoV+Gewicht) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	92
Abb. 3.30	Positionierungsdaten der Lenkradeinstellung der Probanden aus Versuchsreihe I (Gewicht) und Versuchsreihe II (FoV+Gewicht) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	93
Abb. 3.31	Positionierungsdaten der Augpunkte der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	95
Abb. 3.32	Positionierungsdaten der H-Punkte der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	95
Abb. 3.33	Positionierungsdaten der Lenkradeinstellung der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	96
Abb. 3.34	Winkelfehler beim HMD Tracking . . . . .	97
Abb. 3.35	Positionierungsdaten der Augpunkte der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie um die Messabweichung korrigierte Werte aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts) . . . . .	99
Abb. 4.1	Versuchsaufbau zur Übertragung des Effekts der „rubber hand illusion“ in eine virtuelle Umgebung (nach Slater u. a., 2009): synchrone visuelle und haptische Stimulation (links) und Synchronität der visuellen und motorischen Hand- und Fingerbewegung (rechts). . . . .	107
Abb. 4.2	Ausgangssituation der Perzentilsimulation: exemplarisch dargestellt mit dem Ausgangsperzentil M95mm und dem Zielperzentil F05mm (M95mm erlebt den Fahrzeuginnenraum aus der Perspektive der F05mm) . . . .	109
Abb. 4.3	Teilbereiche der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell . .	110
Abb. 4.4	Visuelle Simulation: Der Unterschied der Koordinaten des Augpunkts zwischen Anwender und Zielperzentil wird als fester Offset zu den Trackingkoordinaten addiert . . . . .	111
Abb. 4.5	Perzentilpuppe: Die Körperhaltung und Bewegungen des Anwenders werden in Echtzeit auf das virtuelle Körpermodell des Zielperzentils übertragen. . . . .	112

Abb. 4.6	Verschiebung der Bedienteile: Die Überlagerung visueller und haptischer Informationen bedingt eine Verschiebung der Bedienteile im variablen Fahrerplatzmodell. Rechts: Das Zielperzentil ist hier transparent dargestellt, die sich ergebende Verschiebung der Bauteile und das Körperperzentil des Anwenders sind intransparent dargestellt. . . . .	114
Abb. 4.7	Versuchsaufbau zur Evaluierung der Perzentilsimulation: Verschiebung der Bedienelemente Lenkrad, Schaltknauf und Radiobedienelement bezogen auf das Ausgangsperzentil (blau dargestellt). Die übrigen verschobenen Elemente des Versuchsaufbaus sind in dieser Ansicht verdeckt.	116
Abb. 4.8	Ergebnis der Evaluierung: Darstellung Ramsis Diskomfort und Einschätzung der Probanden . . . . .	118
Abb. 4.9	Ergebnis der subjektiven Bewertung der Perzentilsimulation durch die Probanden . . . . .	121
Abb. A.1	Verteilung der demographischen Daten der Probanden . . . . .	143
Abb. A.2	Erfahrung der Probanden mit dreidimensionaler Darstellung . . . . .	143
Abb. A.3	Erfahrung der Probanden mit stereoskopischer Darstellung . . . . .	143
Abb. A.4	Grad der Kinetose der Probanden während des Versuchs . . . . .	144
Abb. A.5	Verteilung der Ergebnisse aus Versuchsteil I . . . . .	144
Abb. A.6	Übersicht der Ergebnisse der Präsenzbefragung aus dem Versuch zur Größenwahrnehmung . . . . .	145
Abb. B.1	Verteilung der demographischen Daten der Probanden . . . . .	149
Abb. B.2	Erfahrung der Probanden mit dreidimensionaler Darstellung . . . . .	149
Abb. B.3	Erfahrung der Probanden mit stereoskopischer Darstellung . . . . .	150
Abb. B.4	Grad der Kinetose der Probanden während des Versuchs . . . . .	150
Abb. B.5	Verteilung der Probanden in der Studie zur Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien hinsichtlich technischer und nicht-technischer Tätigkeit . . . . .	151
Abb. B.6	Übersicht der Ergebnisse der Präsenzbefragung aus dem Versuch zur Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien . . . . .	160
Abb. C.1	Verteilung der demographischen Daten der Probanden . . . . .	162
Abb. C.2	Subjektiver Beeinträchtigungsgrad der Probanden während des Versuchs (links) und Erfahrung der Probanden mit Head-Mounted Displays (rechts) . . . . .	162
Abb. D.1	Verteilung der demographischen Daten der Probanden . . . . .	163
Abb. D.2	Erfahrung der Probanden mit dreidimensionaler Darstellung . . . . .	163
Abb. D.3	Erfahrung der Probanden mit stereoskopischer Darstellung . . . . .	164
Abb. D.4	Grad der Kinetose der Probanden während des Versuchs . . . . .	164
Abb. D.5	Übersicht der Ergebnisse der Präsenzbefragung aus dem Versuch zur Perzentilsimulation . . . . .	165

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Monokulare und Binokulare Tiefenkriterien (angelehnt an Hofmann, 2002) . . . . .	21
Tab. 2.2	Übersicht zu den Mechanorezeptoren der Haut (angelehnt an Schrader, 2003) . . . . .	27
Tab. 2.3	Übersicht der technischen Daten gebräuchlicher HMD . . . . .	33
Tab. 3.1	Entscheidungsfälle der Signalentdeckungstheorie nach Swets u. Green (1966) . . . . .	61
Tab. 3.2	Entscheidungsfälle der Signalentdeckungstheorie angepasst auf die vorliegende Studie zur Entdeckung von Gestaltungsmängeln in einem Fahrzeuginterieur . . . . .	62
Tab. 3.3	Stellteile nach Stellteiltyp und Greifart nach DIN 894-3 (2000) . . . . .	64
Tab. 3.4	Übersicht zum Vergleich der Ergebnisse zur Positionierung im virtuellen Fahrerplatzmodell von Lorenz (2010) (Virt. FPM) und den nur durch das HMD verursachten Einschränkungen (HMD Einschr.) . . . . .	94
Tab. D.1	Einfaktorielle Varianzanalyse der Ergebnisse aus den Immersionsfragebögen aus den Versuchen zur Größenwahrnehmung, zur Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen und zur Perzentilsimulation . . . . .	167

# 1 Einführung

„Das Auto ist fertig entwickelt. Was kann noch kommen?“ Dieses Zitat aus den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts, das Carl Benz dem Erfinder des Automobils zugesprochen wird, hat sich nach mehr als 125 Jahren automobiler Entwicklungsgeschichte als so nicht haltbar erwiesen. Die zunehmende Menge an Modellen der einzelnen Hersteller, stetige Innovationen in den Bereichen Infotainment und Fahrerassistenz sowie eine andauernde Weiterentwicklung der vorhandenen Komfort- und Sicherheitssysteme stellen die Entwicklungsabteilungen der Automobilkonzerne heute weltweit vor herausfordernde Aufgaben. Der technologische Wandel, die Verkürzung von Produktlebenszyklen und die Globalisierung sind Motoren für die Integration neuer Technologien in den Entwicklungsprozess. Diese Technologien und neuen Inhalte zeichnen sich häufig neben ihrem funktionalen Mehrwert durch Kostenvorteile, aber auch eine steigende Komplexität aus. Zusätzlich soll die Qualität des Fahrzeugs als wichtiger Bestandteil der Kundenzufriedenheit auf einem hohen Level gehalten oder ebenfalls gesteigert werden. Es ist daraus leicht abzuleiten, dass zur Auslegung und Evaluierung der neuen aber auch der nach wie vor vorhandenen Entwicklungsinhalte effiziente Methoden und Werkzeuge eingesetzt werden müssen. Die vorliegende Arbeit soll Anhaltspunkte für den Einsatz einer derartigen effizienten Methodik aus dem Bereich der virtuellen Realität geben, hier angewandt auf das Feld der Innenraumauslegung eines Fahrzeugs unter ergonomischen Gesichtspunkten.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Ausgangslage für das Forschungsvorhaben stellt sich folgendermaßen dar. Für neue Fahrzeugkonzepte werden bereits in sehr frühen Stadien des Entwicklungsprozesses ergonomische Untersuchungen in einem virtuellen Fahrerplatzmodell durchgeführt. Später im Prozess überwiegen als Untersuchungsmedien Ergonomiemodelle im Maßstab 1:1 und Realfahrzeuge.

Aktueller Stand der Technik ist, dass Systeme, die dem Anwender ein virtuelles Umfeld simulieren, von der Forschung in den produktiven Einsatz wechseln. Es ist nun zu bewerten, inwieweit diese neuen Technologien effektiv und effizient eingesetzt werden können. Hierzu sind die Potentiale und Chancen, die durch den Einsatz einer VR-Simulation bestehen, den eventuellen Nachteilen gegenüberzustellen, um aus einer optimalen Kombination mit bewährten Vorgehensmodellen und bekannter Methodik den Entwicklungsprozess zielorientiert weiterzuentwickeln.

Es ist zu evaluieren, welche ergonomischen Aspekte in einem virtuellen Fahrerplatzmodell bewertet werden können. Hierbei sind die Untersuchungsinhalte für eine ergonomische Konzeptentwicklung dem durch die VR-Technologie erweiterten Repertoire an

## 1 Einführung

Untersuchungsmedien zuzuordnen und aufbauend auf entsprechende wissenschaftliche Studien eine Methodik aufzustellen, die die neuen Möglichkeiten für den Anwender optimal in den Entwicklungsprozess einbindet. Wesentliche Fragestellungen des Forschungsvorhabens beinhalten die Bewertbarkeit von Sicht- und Auffindbarkeit, bzw. Anordnung, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit von Elementen im Fahrzeuginnenraum. Die erweiterten Untersuchungsmöglichkeiten sollen in ein angepasstes Vorgehensmodell integriert werden. Neben einem Zeitgewinn steht hierbei auch die Kostenreduktion bei gleichzeitig zuverlässigen und qualitativ hochwertigen Ergebnissen im Vordergrund.

In VR-Systemen können theoretisch neben dem zentralen visuellen Ausgabekanal akustische, kinästhetische, haptische sowie olfaktorische Ausgabesysteme eingesetzt werden. Im visuellen Bereich sind die technologischen Entwicklungen im Vergleich zu den übrigen am weitesten fortgeschritten und besitzen in Forschung und praktischer Anwendung die größte Bedeutung. Es stellt sich nun die Frage, wie eine passende Simulationsmethodik aufgebaut sein muss, um im Zieleinsatzszenario der konzeptionellen Ergonomieauslegung eines Fahrzeuginnenraums einen messbaren Mehrwert zu erzielen. Insbesondere die starke Ausrichtung vergleichbarer Systeme auf den visuellen Ausgabekanal muss hierbei untersucht werden. Im Wesentlichen behandelt die vorliegende Arbeit daher die Anpassung, Evaluierung und Weiterentwicklung eines aktuellen Technologietrends und soll dabei die Frage beantworten, wie sich Technologien der virtuellen Realität einsetzen lassen, um die angesprochenen ergonomischen Fragestellungen effektiv und effizient bearbeiten zu können.

Ziel ist es aufzuzeigen, wie der Mensch mit seiner Wahrnehmung und seinen Reaktionen bzw. Handlungsweisen mittels Methoden der virtuellen Realität in eine rechnergestützte Simulation eines Fahrzeuginnenraums eingebunden werden kann und welchen Mehrwert eine derartige Simulation gegenüber konventionellen Auslegungsmethoden bietet.

### 1.2 Vorgehensweise und Methodik

Die Wahrnehmungsmechanismen in der virtuellen Umgebung selbst sind zentraler Bestandteil einer virtuellen Simulation. Um die Frage beantworten zu können, ob ein neu entwickeltes Werkzeug ein geeignetes Untersuchungsmedium für ergonomische Fragestellungen ist, muss dieser Aspekt detailliert untersucht werden. Virtual-Reality-Umgebungen stellen sich in diesem Zusammenhang sowohl als Forschungsmethode als auch Forschungsgegenstand dar.

In Untersuchungen von Hofmann (2002) wurde festgestellt, dass die Raumwahrnehmung bzw. Tiefenwahrnehmung und die Qualität der haptischen Rückmeldung wesentlichen Einfluss auf die Beurteilungs- und Entscheidungsfähigkeit in einer virtuellen Umgebung haben können und somit eine wichtige Voraussetzung für die Beurteilung der in der virtuellen Realität ermittelten Ergebnisse darstellen. Der Vorgang der Tiefenwahrnehmung in einer VR-Simulation entspricht aufgrund technischer Gegebenheiten nicht der Tiefenwahrnehmung in der Realität. Armbrüster (2008) beschäftigt sich aus diesem Grund mit der Distanzwahrnehmung in virtuellen Umgebungen. Sie zeigt eine

uneinheitliche Ergebnislage verschiedener wissenschaftlicher Studien auf. Viele Studien belegen Distanzunterschätzungen in der virtuellen Umgebung im extrapersonalen Raum. Nur wenige Studien bearbeiten den für die ergonomische Bewertung des Fahrzeuginnenraums wichtigen peripersonalen Raum. Hier zeigen sich auch Distanzüberschätzungen in der virtuellen Realität, allerdings ist die Übertragung der Ergebnisse nur sehr begrenzt möglich. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Unterschiede in der verwendeten Visualisierungstechnologie, im Versuchsaufbau und in den untersuchten virtuellen Welten neben anderen individuellen Faktoren eine wesentliche Rolle spielen. Entsprechende systematische Wahrnehmungsverschiebungen müssen somit als Grundlage für alle weiteren Untersuchungen auch für das in der vorliegenden Arbeit verwendete VR-System ermittelt und im Folgenden berücksichtigt werden.

Um Aspekte wie die Sicht- und Auffindbarkeit, bzw. Erreichbarkeit und Bedienbarkeit von Elementen im Fahrzeuginnenraum mit ausreichender Entscheidungssicherheit beurteilen zu können, stellt aufgrund der technischen Entwicklung der visuelle Ausgabe-Kanal das am häufigsten eingesetzte Medium in der Simulationstechnik dar. Eine einseitige Konzentration auf den visuellen Wahrnehmungskanal widerspricht aber letztlich der Multimodalität als einem Hauptelement virtueller Realität. Ein Ansatz der vorliegenden Forschungsarbeit besteht deshalb darin den haptischen bzw. taktilen Wahrnehmungskanal hier aufgabenspezifisch mit einzubeziehen. Es werden daher bereits bekannte Aufbauten zur Bewertung ergonomischer Fragestellungen zu einem neuen Werkzeug vereint. Auf der einen Seite gibt es physische Modelle im Maßstab 1:1, die zum Teil auch variabel an neue Fahrzeugkonzepte angepasst werden können (vgl. z.B. den Ansatz von Braun, 1999), die allerdings einen Fahrzeuginnenraum systembedingt nur sehr abstrakt darstellen können. Auf der anderen Seite steht der Trend der VR-Technologie mit einer starken Fokussierung auf den visuellen Sinneskanal. Im Ansatz, der in der vorliegenden Arbeit untersucht wird, sind diese beiden Ideen vereint zu einem neuen Werkzeug, dem sog. virtuellen Fahrerplatzmodell. Hauptunterschied zu konventionellen virtuellen Sitzkisten ist die ausgeprägte haptische Rückmeldung über einen flexiblen variablen Fahrzeuginnenraufbau.

In einem vorangehenden Forschungsvorhaben wurden grundsätzliche Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in einer ähnlich aufgebauten virtuellen Umgebungen durchgeführt (Voß, 2008). In der Versuchsreihe wurden hierbei Wahrnehmungsschwellen bei Divergenz zwischen haptischer und visueller Wahrnehmung ermittelt. Anschließend wurde in einer kleinen Expertenstudie die subjektive Bewertung ergonomischer Fragestellungen in virtueller und in realer Umgebung miteinander verglichen. Hierzu wurden Sicht- und Greifuntersuchungen durchgeführt. Die dabei ermittelten Ergebnisse können als Grundlage für die vorliegende Arbeit angesehen werden. Das geplante Forschungsvorhaben soll die ermittelten Ergebnisse systematisch ausweiten, wissenschaftlich absichern und in eine ganzheitliche Bewertung der Untersuchung ergonomischer Fragestellungen aus der Konzipierungsphase eines Fahrzeuginnenraums in einer VR-Simulation überführen.

Als Untersuchungsmethodik soll hierzu ein möglichst objektiver Ansatz gewählt werden. Gude (2004) konnte in seinen Untersuchungen zeigen, dass die virtuelle Realität zur Validierung ergonomischer Faktoren auf dem Gebiet des Gesundheitsschutzes am

## 1 Einführung

Arbeitsplatz als effektives Untersuchungsmedium eingesetzt werden kann. Inhaltlich ist diese Studie vom Untersuchungsfokus Fahrzeuginnenraum deutlich entfernt, des Weiteren gibt es Unterschiede in der Visualisierungstechnologie sowie in der Versuchsumgebung. Dennoch kann die Studie als Hinweis auf die Eignung einer virtuellen Umgebung zur Validierung ergonomischer Faktoren angesehen werden. Derselbe Autor zeigt weiterhin, dass Probandenstudien auf Basis der Signalentdeckungstheorie gut geeignet sind um die Eignung eines Untersuchungsmediums für bestimmte Untersuchungsinhalte nachzuweisen. In der vorliegenden Arbeit soll dieser Ansatz aufgegriffen werden und an die spezifischen Gegebenheiten der Ergonomie in einem Fahrzeuginterieur und des zu untersuchenden Werkzeugs, des virtuellen Fahrerplatzmodells, angepasst werden.

Als weiterer wichtiger Aspekt der vorliegenden Arbeit soll der Mehrwert des aufgebauten virtuellen Fahrerplatzmodells gegenüber konventionellen Auslegungsmethoden aus dem CAD-Bereich untersucht werden. Dazu wird das virtuelle Fahrerplatzmodell zur sogenannten Perzentilsimulation weiterentwickelt. Im Gegensatz zu einem arbeitswissenschaftlichen digitalen Menschmodell, dessen Hauptzweck in der Simulation einer bestimmten Population besteht, dient das in der Perzentilsimulation verwendete digitale Menschmodell vor allem dem Erleben des virtuell simulierten Fahrzeuginterieurs aus der Ego-Perspektive eines beliebigen Körperperzentils. Es wird die grundlegende Theorie zur Perzentilsimulation aufgebaut, im virtuellen Fahrerplatzmodell umgesetzt und in einer Probandenstudie evaluiert.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Nach einem einleitenden Kapitel wird im Theorieteil der Arbeit ein Überblick zu Technologien aus dem Bereich der virtuellen Realität gegeben. Dazu werden grundsätzliche Begrifflichkeiten geklärt und der Einsatz derartiger Technologien in der Fahrzeugentwicklung beschrieben. Anschließend wird das Einsatzgebiet des virtuellen Fahrerplatzmodells näher detailliert, die Konzeptentwicklung eines Fahrzeuginterieurs unter ergonomischen Gesichtspunkten. Dazu werden bereits verfügbare und eingesetzte Technologien beschrieben als auch das Potential für Weiterentwicklungen aufgezeigt. Der Theorieteil der vorliegenden Arbeit wird mit einem Kapitel zur Beschreibung des Gesamtsystems virtuelles Fahrerplatzmodell abgerundet. Um die Ausprägung und den Aufbau dieses Systems verstehen zu können, erfolgt dazu zunächst ein kurzer Exkurs zum menschlichen Wahrnehmungsapparat und multisensorischen Reizen. Hauptzweck eines VR-Systems ist unter anderem die Simulation dieser Reize, daher wird darauf aufbauend der grundlegende Aufbau und die wesentlichen Komponenten von VR-Systemen beschrieben. Aus dem charakterisierten Einsatzgebiet und den verfügbaren Technologien lässt sich abschließend der Systemaufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells als intelligente Schnittmenge aus Anforderungen und technologischen Lösungsansätzen ableiten.

Der zweite Abschnitt der vorliegenden Arbeit beschreibt die Evaluierung des virtuellen Fahrerplatzmodells als Beurteilungswerkzeug für ergonomische Fragestellungen in frühen Entwicklungsphasen. Als Bausteine zur Validierung werden dabei vier Evaluierungsstudien beschrieben, die direkte Rückschlüsse auf Effizienz und Effektivität des entwickelten

Werkzeugs zulassen. Die Untersuchungen zur Größenwahrnehmung, zur Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien und zur Sitzposition im virtuellen Fahrerplatzmodell zeigen dabei dessen Potenzial als unterstützendes Werkzeug zur Beantwortung ergonomischer Fragestellungen bei der Auslegung eines Fahrzeuginterieurs. Sie werden ergänzt durch eine Untersuchung von Bewegungen zur Entnahme eines Bechers aus einem Becherhalter in virtuellen und realen Umgebungen und einer hierfür entwickelten Systematik zur Erkennung und Auswertung virtueller Kollisionen.

Der darauf folgende Abschnitt der Arbeit widmet sich der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell. Diese Weiterentwicklungsstufe stellt einen Mehrwert durch die virtuelle Simulationstechnik dar, der mit bisheriger konventioneller arbeitswissenschaftlicher Simulationsmethodik nicht realisierbar war. Das Kapitel beschreibt die zugrundeliegenden theoretischen Zusammenhänge, leitet daraus die konkrete Umsetzung im virtuellen Fahrerplatzmodell ab und beschreibt die Ergebnisse aus der durchgeführten Evaluierungsstudie zu diesem Thema. Im abschließenden Kapitel werden die Inhalte der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben, die im Zusammenhang mit dem entworfenen Gesamtkonzept und den bearbeiteten Problemfeldern stehen.



## 2 Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Zusammenhänge dargestellt, auf denen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Studien basieren. Nach einer Hinführung zum Thema Virtuelle Realität werden Anforderungen an ein virtuelles Fahrerplatzmodell anhand des vorgesehenen Einsatzgebietes des VR-Systems, die ergonomische Auslegung eines Fahrzeuginterieurs, abgeleitet und schließlich Konzeption und Aufbau eines virtuellen Fahrerplatzmodells beschrieben.

### 2.1 Virtuelle Realität in der Fahrzeugentwicklung

Systeme, die dem Begriff Virtuelle Realität zugeordnet werden, sind heute bei der Entwicklung von Fahrzeugen Stand der Technik. Zum besseren Verständnis und zur Einordnung der vorliegenden Arbeit wird deshalb im Folgenden ein Überblick zur Nutzung virtueller Realität in der Entwicklung und Konzipierung von Fahrzeugen gegeben.

#### 2.1.1 Grundlagen: Virtual Reality , Augmented Reality und Mixed Reality

Der Begriff *Virtuelle Realität* wird in der Fachliteratur häufig in seiner englischen Entsprechung verwendet: *Virtual Reality*, abgekürzt *VR*. Diese Kombination zweier Wörter mit eigentlich gegensätzlicher Bedeutung ist nicht unumstritten, kann aber im Allgemeinen mit einer „vom Computer simulierten Wirklichkeit“ (Duden, 2009) gleich gesetzt werden. Der Brockhaus (Brockhaus, 1997) verwendet hierfür folgende Definition: „eine mittels Computer simulierte Wirklichkeit oder künstliche Welt, in der Personen mittels technischer Geräte sowie umfangreicher Software versetzt und interaktiv eingebunden werden.“. Schrader (2003), Stähler (2007) und weitere Autoren stellen fest, dass sich hierzu in der Literatur unterschiedlichste Begrifflichkeiten wie Virtual Environment, Virtual Presence, Artificial Reality oder Cyberspace finden lassen. An dieser Stelle soll nicht weiter auf diese Begriffsvielfalt eingegangen werden, deren Definition „das äußerste Maß an wissenschaftlicher Präzision fehlt“ (Schrader, 2003). In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff *Virtual Reality* oder seine deutsche Entsprechung *Virtuelle Realität* verwendet und entsprechend der Nutzung dieses Begriffes in der Literatur und im Sprachgebrauch als Oberbegriff für die Gesamtheit der virtuellen Technologien verstanden. Diese Technologien erlauben es dem Nutzer in der Regel virtuelle Objekte sowohl zu betrachten als auch zu manipulieren, gehen aber über die Möglichkeiten eines normalen Bildschirm-

arbeitsplatzes mit dreidimensionaler Grafikdarstellung aus dem CAX-Bereich <sup>1</sup> hinaus, beispielsweise durch die Darstellung auf stereoskopischen Displays oder Projektionsumgebungen.

In den letzten Jahrzehnten sind auf dem Bereich der dreidimensionalen Computergrafik enorme Leistungssteigerungen zu verzeichnen. In vielen Branchen werden die dabei entwickelten Methoden dreidimensionaler CAD, CAE und CAM Programme erfolgreich eingesetzt. Auch aus dem Bereich der Computerspieleindustrie wird viel zur Weiterentwicklung und Verbreitung der computerbasierten dreidimensionalen Darstellung beigetragen. Allerdings unterscheidet sich die Interaktion mit diesen 3D-Systemen kaum von der Benutzung herkömmlicher 2D-Computersysteme mit Hilfsmitteln wie Computermaus, Tastatur und gewöhnlichem 2D-Monitor. Die modellierten Objekte befinden sich dabei in ihrer eigenen künstlichen Welt, abgeschottet von der realen Welt des Nutzers.

Ein Leitgedanke der *Virtuellen Realität* besteht darin diese beiden Welten zu vereinen, d.h. der Nutzer wird in die rechnerbasierte dreidimensionale Welt integriert. Natürlich ist die umgekehrte Art und Weise der Integration ebenso denkbar, vom Computer simulierte Objekte werden in die Welt des Nutzers eingebunden. Diese Integration beschränkt sich dabei nicht wie häufig angenommen nur auf visuelle Informationen, sondern sollte möglichst alle Sinneskanäle des Menschen abdecken. Einer der bekanntesten Vordenker auf dem Gebiet stellt diesen Zusammenhang sehr anschaulich in folgendem Zitat dar:

*„The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could be the Wonderland into which Alice walked“ (Sutherland, 1965)*

Das Zitat macht deutlich: Je mehr Sinneskanäle von einem VR-System angesprochen werden können, desto umfassender fühlt sich der Nutzer in die virtuelle Welt eingebunden, d.h. desto größer ist der Grad der Immersion<sup>2</sup> (Hofmann, 2002). Der Anwender soll den Eindruck bekommen, sich physisch in der virtuellen Umgebung zu befinden und sich seiner realen Umgebung während der Simulation möglichst nicht bewusst sein. Dem idealen Verständnis nach spricht also die virtuelle Umgebung mehrere sensorische Kanäle des Anwenders an und lässt so ein konsistentes Abbild der Realität entstehen, mit dem in Echtzeit interagiert werden kann. Abbildung 2.1 zeigt schematisch den zu Grunde liegenden Zusammenhang zwischen den verschiedenen Sinneskanälen des Nutzers, der Umwelt und dem VR-System. Aktuelle VR-Systeme setzen vor allem auf die Darstellung visueller und akustischer Informationen. Die realitätsnahe Umsetzung einer haptischen<sup>3</sup> Rückmeldung gestaltet sich aus technischer Sicht deutlich schwieriger, sie

---

<sup>1</sup>Unter CAX versteht man die begriffliche Zusammenfassung verschiedener rechnergestützter Technologien: die am meisten verbreiteten sind wohl Computer Aided Design (CAD), Computer Aided Engineering (CAE), Computer Aided Manufacturing (CAM) oder Computer Aided Testing (CAT)

<sup>2</sup>Immersion (lat. immersio = Eintauchen) beschreibt das Eintauchen bzw. den Grad des Eintauchens eines Nutzers in eine virtuelle Umgebung. (Bartle, 2003)

<sup>3</sup>Als haptische Wahrnehmung (griech. haptikós = zum Berühren geeignet) bezeichnet man das aktive

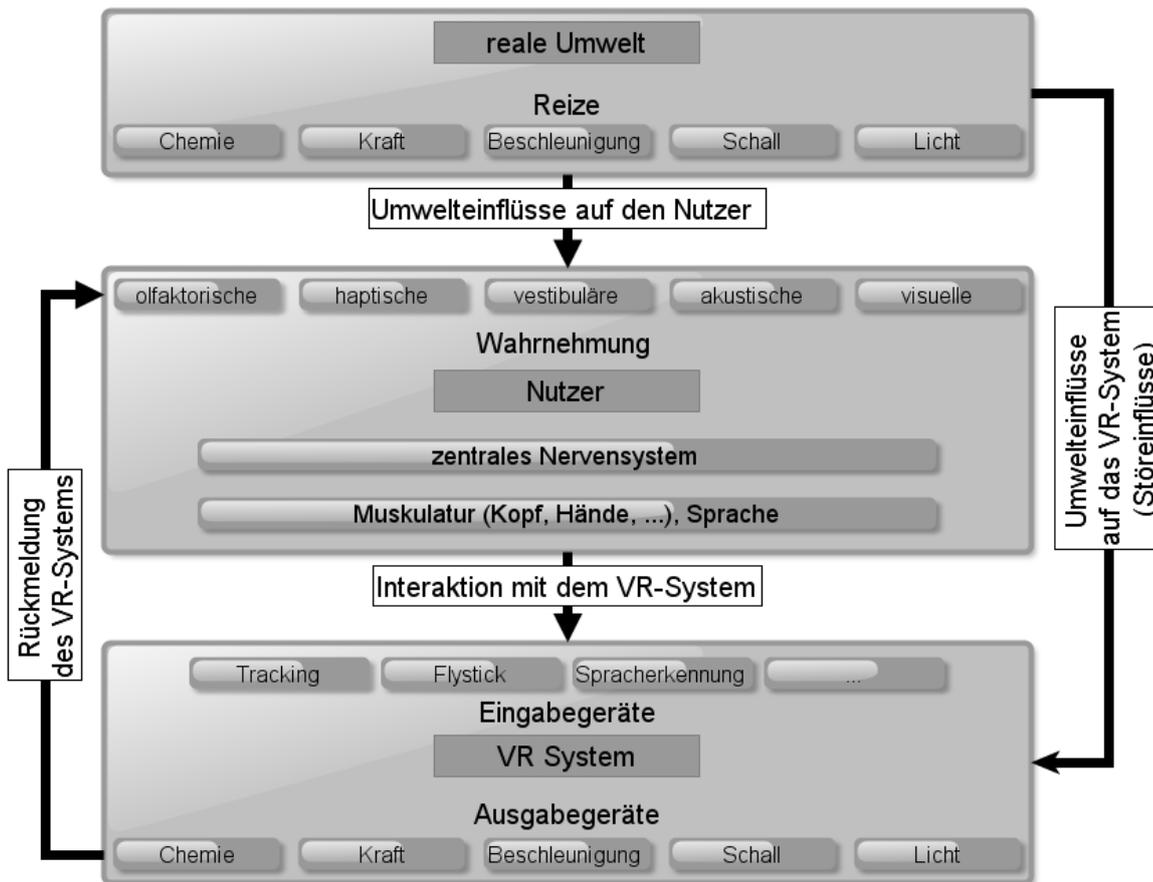


Abb. 2.1: Wirkgefüge zwischen Nutzer, Umwelt und VR-System (angelehnt an Schmidtke, 1993)

ist in diversen Ein- bzw. Ausgabegeräten verschiedener VR-Systeme umgesetzt. In diversen Simulatoren aus der Fahrzeugtechnik und Flugzeugtechnikbranche wird gezielt die vestibuläre<sup>4</sup> Wahrnehmung des Menschen angesprochen. Olfaktorische<sup>5</sup> Reize spielen in aktuellen Systemen eine untergeordnete Rolle (Engstler, 2005).

Ziel ist es beim Nutzer den Eindruck zu erwecken sich tatsächlich in der computer-generierten Umgebung zu befinden. Dieser Zusammenhang kann nach Brill (2009) als mentaler Prozess verstanden werden, nicht die vollkommen realistische Darstellung ist das Ziel, sondern dass der Anwender die Darstellung als real akzeptiert. Dies wird erreicht durch hinreichende sensorische Informationen und die Möglichkeit diese Informationen kontrollieren und modifizieren zu können.

Erfühlen oder Ertasten eines Objektes durch Integration aller Hautsinne. Bestandteil der haptischen Wahrnehmung sind u.a. die taktile Wahrnehmung (Bestandteil der Oberflächensensibilität) und die Tiefensensibilität

<sup>4</sup>Vestibuläre Wahrnehmung bezeichnet den Gleichgewichtssinn, d.h. die Wahrnehmung von Lageänderungen und Rotationen des eigenen Körpers

<sup>5</sup>Olfaktorische Wahrnehmung ermöglicht die Wahrnehmung von Reizen durch den Geruchssinn

Allerdings ist nicht für alle Anwendungen, in denen die Realität simuliert wird, ein Höchstmaß an Immersion notwendig. Eine dahingehende Kategorisierung wird von Milgram u. a. (1995) hinsichtlich der Unterscheidung von *Augmented Reality* (AR, dt. erweiterte Realität) und *Mixed Reality* getroffen. Beide Begriffe werden häufig im Zusammenhang mit dem Begriff der *Virtuellen Realität* verwendet. Abbildung 2.2 zeigt diese Kategorisierung. Je weiter ein System hierbei in Richtung „vollständig real“ eingeordnet werden kann, desto mehr kann vom Anwender seine reale Umgebung wahrgenommen werden und desto weniger spielt die Immersion hierbei eine Rolle. Die virtuelle Realität ist aus diesem Grund in Abbildung 2.2 auf der gegenüberliegenden Seite angeordnet und stellt somit wie bereits dargelegt diesbezüglich die höchsten Ansprüche an den Immersionsgrad. Systeme, die der Kategorie *Augmented Reality* zuzuordnen sind, zeichnen sich durch eine Erweiterung der realen Umgebung um virtuelle Informationen aus. Head-Up-Displays (HUD) und Head-Mounted Displays (HMD) sind hierzu oft genannte Beispiele. Diese u.a. in modernen Fahrzeugen eingesetzte Technik erlaubt es, Informationen wie Navigationshinweise oder Geschwindigkeitsangaben direkt ins Sichtfeld des Fahrers einzublenden. *Augmented Virtuality* stellt eine Mischform aus AR und VR dar.

Im allgemeinen Sprachgebrauch verwischen die Grenzen zwischen den dargestellten Kategorien und häufig werden Anwendungen dem Begriff VR zugeordnet, der eben dargelegten Definition widersprechend. Als Vorwegnahme soll deshalb an dieser Stelle die vorliegende Arbeit in das eben beschriebene Schema eingeordnet werden. Das virtuelle Fahrerplatzmodell ist als Gesamtsystem der Kategorie *Augmented Virtuality* zuzuordnen. Zwar ist die Visualisierungskomponente hierbei ein reines VR-System, aber zur Darstellung des haptischen Feedbacks wird die „reale“ Komponente variables Fahrerplatzmodell eingesetzt. Rein virtuelle Methoden bieten im aktuellen Stand der Technik nicht die Möglichkeit die komplexe Umgebung eines Fahrzeuginnenraums in allen Einzelheiten haptisch darzustellen. Aktuell sind keine Ansätze bekannt, die diese grundlegende Problematik mittelfristig lösen könnten.

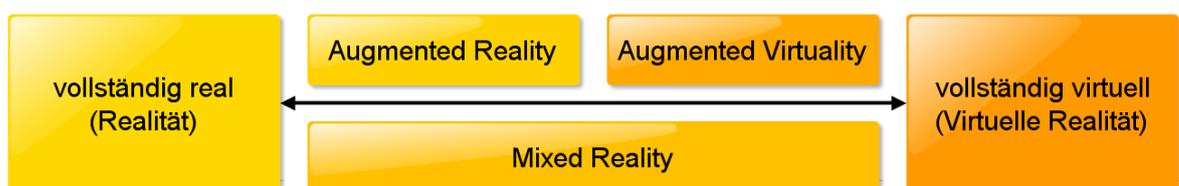


Abb. 2.2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Abstufungen zwischen Realität und virtueller Realität (angelehnt an Milgram u. a., 1995)

### 2.1.2 Virtuelle Realität in den frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung

VR-Systeme werden heute bereits in den frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung eingesetzt. Es wurde erkannt, dass mit derartigen Hilfsmitteln die Qualität und Kosten

des finalen Produkts maßgeblich beeinflusst werden können. Dabei unterstützen VR-Systeme in der frühzeitigen und systematischen Beurteilung von Entwicklungsständen sowohl in den technischen Abteilungen selbst als auch bei der Kommunikation mit nicht technischen Bereichen, wie beispielsweise Management oder Marketing (Haines u. a., 2002).

Projektions- und Interaktionstechnologien aus dem Bereich der VR-Systeme werden beispielsweise für die realitätsnahe Besprechung und Beurteilung früher Designentwürfe herangezogen. Auch der partielle Ersatz physikalischer Modelle durch Visualisierung mittels VR-Systemen im Bereich der sogenannten Datenkontrollmodelle ist heutzutage fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses in der Automobilbranche. Auch hierbei werden hohe Anforderungen an eine realitätsgetreue Visualisierung gesetzt, auf die Echtzeitfähigkeit der Modelle und die korrekte Berechnung und Darstellung von Lichteffekten wird hierbei großer Wert gelegt. Ein weiteres Einsatzgebiet für Methoden der virtuellen Realität besteht in der Visualisierung komplexer und rechenintensiver Simulationsergebnisse beispielsweise aus dem Bereich der Crashesimulation. Hier bietet die virtuelle Realität den Vorteil, Prozesse, die in Realität sehr schnell ablaufen, beliebig oft zu wiederholen, nachvollziehbar zu verlangsamen oder aus beliebigen Positionen zu erleben. Auch Methoden aus dem Bereich der Einbaumontagesimulation können frühzeitig mittels virtueller Realität durchgeführt werden. Somit kann lange vor dem Aufbau physischer Prototypen überprüft werden, ob und wie sich bestimmte Komponenten am Fahrzeug verbauen lassen. Auch zur Erprobung der Kundenakzeptanz im Rahmen einer Produktklinik wird teilweise auf Anwendungen aus dem Bereich virtuelle Realität zurückgegriffen. Die Nutzung virtueller Welten zur Kundenintegration in die Entwicklung neuer Fahrzeuge wird beispielsweise bei Daecke (2009) ausführlich dargestellt.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt allerdings auf der Anwendung von Technologien aus dem Bereich virtuelle Realität in einem anderen Bereich: der ergonomischen Auslegung des Fahrzeuginnenraums in den frühen Phasen der Konzipierung eines Fahrzeugs. Nach Gude (2008) setzt der Einsatz virtueller Realität in der ergonomischen Auslegung eines Fahrzeuginterieurs Funktionalitäten voraus, die über eine reine Visualisierung hinaus gehen. Als wichtigstes Element identifiziert er dabei eine angemessene Repräsentation der Nutzer beispielsweise mittels eines digitalen Menschmodells zur Beurteilung ergonomischer Beurteilungskriterien wie die Prüfung von Freiräumen, Körperhaltungen, Sichtbedingungen, Greif- und Erreichbarkeitsräumen. Insbesondere die Beurteilung aus der Situation des Nutzers ist hier Gegenstand der Simulation. Verschiedene Aspekte einer Neuentwicklung können in der virtuellen Realität subjektiv erfahrbar gemacht werden. So kann beispielsweise die Handhabung oder Positionierung neuartiger Stellteile visualisiert und auch mittels haptischer Rückmeldung realitätsnah erlebbar gemacht werden (Gude, 2008).

Der Mehrwert derartiger Simulationen gegenüber konventionellen Methoden aus dem CAX-Bereich liegt vor allem darin begründet, dass die betrachteten Zusammenhänge realitätsnah erlebbar werden. Die Simulation komplexer Systeme am Rechner ist gekennzeichnet von hoher Flexibilität und Effizienz. Häufig werden Vorgänge simuliert, deren Eigenschaften und Verhalten mittels ausreichend genauer mathematischer Modelle beschrieben werden können. Dieser Aspekt stellt eine Herausforderung für den Einsatz in

## *2 Theoretischer Hintergrund*

der Ergonomie und Arbeitswissenschaft dar, da der Mensch mit seiner subjektiven Wahrnehmung und daraus resultierenden Handlungsweisen nur bedingt in mathematischen Modellen parametrisch darstellbar ist. Um die genannten Vorteile dennoch im Rahmen einer Simulation nutzen zu können, besteht ein Lösungsansatz darin den Menschen mit Methoden der virtuellen Realität im Sinne einer „operator-in-the-loop“-Anordnung in die Simulation einzubinden (Hagenmeyer u. a., 2003). Damit stellen Anwendungen aus dem Bereich der virtuellen Realität auf diesem Gebiet eine optimale Ergänzung zum Einsatz konventioneller CAX-Methoden dar.

## 2.2 Ergonomie Konzeptentwicklung - Beschreibung des Einsatzgebietes

Eine frühzeitige Vorgabe und Überprüfung von ergonomischen Gestaltungskriterien im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs führt zu einer Verbesserung der Qualität, einer Verkürzung der Entwicklungszeiten und einer Verringerung der Entwicklungskosten. Dieses thematische Umfeld stellt das Einsatzgebiet des virtuellen Fahrerplatzmodells dar und wird deshalb im folgenden Abschnitt eingehend beschrieben.

### 2.2.1 Grundlagen der ergonomischen Konzeptauslegung eines Fahrzeugs

Im Fokus der ergonomischen Auslegung des Fahrzeuginnenraums stehen die optimale Bedien- und Handhabbarkeit des Fahrzeugs durch den Fahrer. Diese Aspekte müssen von Beginn der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs an in den Auslegungsprozess mit eingebracht werden. Bei der Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes sind neben der Sicht nach außen vor allem Themen aus den Bereichen Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit der vorhandenen Bedienelemente von hoher Bedeutung. Dabei sind sowohl Bedienelemente, die der Erfüllung der primären Fahraufgabe<sup>6</sup> dienen, zu beachten als auch Bedienelemente, die zur Bedienung des Fahrzeugs (z.B. Schaltung oder Scheibenwischer) oder der Befriedigung von Komfort- oder Informationsbedürfnissen (z.B. Klimaanlage oder Radio) vorgesehen sind. Aber auch grundsätzliche Vorgaben und Analysen zu Verstellbereichen etwa von Lenkrad und Sitz sollen den Körperabmessungen und Körperhaltungen des Menschen in möglichst optimaler Form gerecht werden. In der Vergangenheit wurden daher häufig umfassende Normwertetabellen eingesetzt, die heute weltweit zur Verfügung stehen und in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden. Auf Basis dieser Datensätze können statistisch relevante Größen- und Längenmaße abgeleitet werden und in den Konstruktionsplänen berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise mit zweidimensionalen, teilweise beweglichen Schablonen (z.B. der sogenannten „Kieler Puppe“) geschehen, dargestellt in Abbildung 2.3. Wesentlicher Nachteil dieses Ansatzes ist die Lösungssuche im zweidimensionalen Raum für die dreidimensionalen Probleme des Fahrzeuginterieurs (Schrader, 2003). Stand der Technik sind daher heute Ergonomiewerkzeuge und digitale arbeitswissenschaftliche Menschmodelle, die sich direkt in der dreidimensionalen CAD-Umgebung einsetzen lassen und eine effiziente Analyse ergonomischer Fragestellungen ermöglichen (siehe Abbildung 2.3). So sind beispielsweise die Erzeugung dreidimensionaler Vorgabeflächen, die Erzeugung verschiedener Sichtkegel und Erreichbarkeits-Hüllflächen sowie Spiegelungsuntersuchungen problemlos möglich.

Gemeinsam ist den zweidimensionalen Methoden sowie den eben beschriebenen Weiterentwicklungen mit dreidimensionalem Ansatz die Tatsache, dass sich bestimmte Aspekte des Fahrzeuginnenraums nicht in ausreichendem Grad objektivieren lassen bzw. eine Simulation des Menschen nicht zu aussagekräftigen Ergebnissen führt. Als Beispiel

---

<sup>6</sup>Als primäre Fahraufgabe werden Aufgaben verstanden, die für das Halten des Fahrzeugs auf der Fahrbahn notwendig sind, z.B. Bremsen und Lenken.



Abb. 2.3: Auslegungswerkzeuge für die Ergonomie im Fahrzeuginnenraum. Links: Bewegliche Ergonomieschablone (Schrader, 2003), Mitte: digitales Menschmodell Ramsis (Seidl, 2011) und rechts: 1:1-Modell des Fahrzeuginnenraums (Schrader, 2003)

lässt sich hier die optimale Höhe einer Armlehne anführen, zwar lassen sich mit ausreichenden anthropometrischen Datensätzen grobe Vorgaben vornehmen. Allerdings kann hier die subjektive Empfindung des Menschen nicht vernachlässigt werden. Weitere passende Beispiele werden in diesem Zusammenhang u.a. bei Schrader (2003) und Braun (1999) angeführt. Die Erprobung derartiger Auslegungen in der realen Praxis ist daher bei bestimmten Fragestellungen unerlässlich. Zu diesem Zweck werden Modelle des Fahrzeuginterieurs im Maßstab 1:1 hergestellt. Sie dienen neben der Analyse mittels Probandenuntersuchungen auch als Grundlage für Arbeitsbesprechungen des aktuellen Entwicklungsstands und sollen u.a. mögliche Verbesserungen in der ergonomischen Auslegung für Entwickler und Management erlebbar darstellen. Je nach Zeitpunkt und den darzustellenden Inhalten kommen unterschiedliche Modellaufbauten zum Einsatz. Mit zunehmendem Reifegrad der Interieurentwicklung werden die Modelle immer detailgetreuer und damit auch aufwendiger. Um ein komplettes Fahrzeuginterieur realistisch wiedergeben zu können, muss ein hoher Kosten- und Zeitaufwand betrieben werden, wobei das Risiko eines veralteten Datenstandes nach der Fertigstellung niemals ausgeschlossen werden kann.

### 2.2.2 Potential virtueller Methoden im Bereich der Ergonomie Konzeptentwicklung

Es stellt sich folglich die Frage, wie der Prozess der Entwicklung ergonomischer Vorgaben, die Analyse von Auslegungen und die Erprobung von Entwicklungsständen in den Bereichen Sichtbarkeit, Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit von Bedienelementen in einem Fahrzeuginterieur durch Methoden aus der virtuellen Realität unterstützt werden können.

(Engstler, 2005) zeigt hierzu einige Einsatzmöglichkeiten von VR-Systemen für ergonomische Fragestellungen auf. Für die Nutzung von Powerwall-Umgebungen im Sinne eines Designreview können in der Ergonomiekonzeptauslegung zunächst die gleichen Vorteile angeführt werden wie in anderen Fachrichtungen. Entwicklungsstände

lassen sich in realer Größe stereoskopisch darstellen und betrachten. Für den Einsatz als Kommunikations- und Arbeitswerkzeug ist diese Anwendung prädestiniert. Insbesondere die Kombination der stereoskopischen Darstellung, sei es über eine Powerwall, eine CAVE<sup>TM</sup>-Umgebung<sup>7</sup> oder ein Head-Mounted-Display, mit Mixed-Reality-Anwendungen ermöglicht die Bewertung eines virtuellen Fahrzeuginnenraums in einer sehr realitätsnahen Abbildung. Schrader (2003) nennt weiterhin die Bewertung eines Entwicklungsstandes des Fahrzeuginterieurs in typischen Umgebungen als wichtige Anforderung an eine derartige Anwendung, beispielsweise zur Beurteilung der Ampelsicht oder anderer Sichtverdeckungen nach außen.

Ein derartiger Aufbau sollte sich jedoch nicht nur auf die visuelle Darstellung beschränken, da ansonsten auch nur eine visuelle Beurteilung erfolgen kann. Eine Erweiterung mit digitalen Menschmodellen bietet den Vorteil das Anwendungsgebiet auf weitere anthropometrische Bereiche auszudehnen. Es existieren bereits verschiedene Ansätze aus dem Bereich der Fahrzeugentwicklung, die auf diesen Ideen aufbauen und dem Umfeld Mixed-Reality-Anwendung zuzuordnen sind.

Schrader (2003) beschreibt in seiner Arbeit detailliert die Konzipierung und den Aufbau einer virtuellen Sitzkiste. Das Themenfeld seiner Arbeit behandelt neben einer umfassenden Übersicht möglicher technischer Komponenten vor allem die grundlegende Konzipierung des Aufbaus und die Auswahl entsprechender Komponenten vor einem informationstechnischen Hintergrund. Ähnliche Ansätze werden auch bei Hoffmann (2005) und Voß (2008) dargestellt und sind exemplarisch abgebildet in Abbildung 2.4.

Kennzeichnende Eigenschaften dieser Ansätze bestehen in der Verwendung stark abstrahierter realer Sitzkistenaufbauten und der Ergänzung dieser Aufbauten mit einer VR-Visualisierung, z.B. mittels HMD oder CAVE<sup>TM</sup>. Der Sitzkistenaufbau dient im Wesentlichen der haptischen Rückmeldung in der Simulation. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Auf der einen Seite ein stark vereinfachtes reales Fahrzeuginterieur: Das physische Fahrzeuginterieur umfasst nur Pedalerie, Lenkrad und Fahrersitz. Die Möglichkeiten der haptischen Rückmeldung sind hier sehr stark eingeschränkt (vgl. Abbildung 2.4, Mitte). Andererseits gibt es Ansätze, die das Fahrzeuginterieur auch physisch sehr detailliert nachbilden, dadurch aber auch den Einsatzbereich der Sitzkiste auf ein bestimmtes Fahrzeuginterieur beschränken. Die durch die VR-Simulation gegebene Flexibilität kann hierbei wieder deutlich eingeschränkt werden.

In verschiedenen Arbeiten werden variable physische Sitzkisten vorgestellt, die durch ihre große Flexibilität und schnelle Konfigurierbarkeit über die Anbindung an CAD-Systeme ein großes Spektrum an Fahrzeuginnenräumen darstellen können (Braun, 1999; Richards u. Bhise, 2004). Der Aufbau von Richards u. Bhise (2004) ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Derartige physische Aufbauten eignen sich ideal, um die Visualisierung eines Fahrzeuginterieurs durch ein haptisches Feedback zu ergänzen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Verbindung dieser beiden Ansätze, also die Ergänzung einer visuellen Simulation mit einer ebenso flexiblen haptischen Simulation. Es soll eine Augmented-Virtuality-Simulation entwickelt werden, sowie der Nachweis erfol-

---

<sup>7</sup>CAVE<sup>TM</sup>(Cave Automatic Virtual Environment) ist ein eingetragener Markenname des University of Illinois Board of Trustees.



Abb. 2.4: Aufbauten physischer Sitzkisten. Links: variable Sitzkiste (nach Richards u. Bhise, 2004), Mitte und rechts: abstrahierte Sitzkistenaufbauten für VR-Anwendungen (nach Schrader, 2003; Voß, 2008)

gen, dass eine solche Vorrichtung die realitätsnahe Simulation eines Fahrzeuginnenraums unter Einbeziehung des Anwenders mit seiner Wahrnehmung, seinen Reaktionen und Handlungsweisen ermöglicht.

Der Vorteil einer derartigen Simulation gegenüber realen Modellen im Maßstab 1:1 besteht u.a. in einer deutlichen Kostenersparnis. Zwar sind zunächst die Investitionskosten für eine derartige Simulation deutlich höher als der Kostenaufwand für ein einzelnes physisches 1:1-Modell. Allerdings amortisieren sich die Investitionskosten mittelfristig, da der Kostenaufwand für weitere Modelle entfällt. Mit dem Hintergrund der steigenden Modellpalette der einzelnen Hersteller in der Automobilbranche entstehen daher Kostenvorteile gegenüber dem Wettbewerb. Ein weiterer Vorteil besteht in der Aktualität des dargestellten Entwicklungsstandes und der Flexibilität des Modells. Der Herstellungszeitraum für ein physisches Modell des Fahrzeuginnenraums beträgt mehrere Monate. Einen neuen Entwicklungsstand für die Mixed-Reality-Simulation vorzubereiten, benötigt nur wenige Stunden. Durch diese Aufwandsreduzierung ergeben sich weitere Kostenvorteile. Desweiteren ist die Simulation weitaus flexibler als ein physisches Modell. Das Darstellen mehrerer Varianten oder das schnelle Hin- und Herschalten zwischen diesen stellt keinen nennenswerten Mehraufwand dar. Überdies ist es in der Simulation auch möglich, physikalische Gesetze scheinbar außer Kraft zu setzen, wenn dies gewünscht ist. Ein passendes Beispiel hierzu ist die Darstellung erster Vorgabeflächen, die scheinbar frei im Raum schweben, aber dennoch in diesem frühen Stadium von den Entwicklern immersiv erlebt und bewertet werden können. In diesem immersiven Erleben eines virtuellen Fahrzeuginnenraums ist der wesentliche Mehrwert der beschriebenen VR-Methodik gegenüber konventionellen CAX-Werkzeugen zu sehen. Die Anwender sind in einer sehr frühen Phase der Entwicklung in der Lage, einen Datenstand stereoskopisch und damit äußerst realitätsnah zu erleben und zu bewerten. Der Abstraktionsprozess, d.h. der Aufwand des Hineinversetzens in den Entwicklungsstand wird deutlich verringert. Wichtige subjektive Faktoren wie etwa der störende Einfluss von Spiegelungen in Front- und Seitenscheiben können direkt aus der Perspektive des Fahrers erlebbar dargestellt werden. Der Entwickler kann sich virtuell in sein Fahrzeug setzen und den aktuellen Entwicklungsstand realitätsnah erproben und beurteilen.

Engstler (2005) nennt als zusätzlichen Mehrwert für das Erleben im dreidimensionalen Raum noch folgenden Aspekt: Menschliche Bewegungen erfolgen immer in drei Dimensionen, daher ist die Benutzung herkömmlicher Bildschirmarbeitsplätze mit zweidimensionalen Eingabegeräten bei der Positionierung oder Bewegung dreidimensionaler Menschmodelle häufig sehr komplex. Durch die dreidimensionale, intuitive Bedienung in einer Mixed-Reality-Simulation könnte diese Handhabung vereinfacht und beschleunigt werden. Derselbe Autor gibt auch einen theoretischen Hinweis auf die Perzentilsimulation (siehe Kapitel 4), allerdings ohne genauere Details zu einer möglichen Umsetzung zu nennen: „Damit wird durch eine entsprechenden Skalierung und Verschiebung von Umgebung und Menschmodell auch eine Simulation verschiedener Anthropometrien für einen einzelnen Nutzer ermöglicht.“

Der konsequente Einsatz von rechnergestützten Simulationenmethoden trägt zu einer Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess bei. Ersetzt man beispielsweise die Erprobung in physischen Modellen durch eine verstärkte Nutzung der Möglichkeiten von VR-Simulationen, ergeben sich daraus Zeitvorteile, die gleichzeitig einen stark kostenreduzierenden Faktor darstellen und Raum für weitere Ideen und Innovationen lassen (Sisca u. a., 2008). Der Mehrwert von Simulationenmethoden im Entwicklungsprozess wird schematisch in Abbildung 2.5 aufgezeigt.

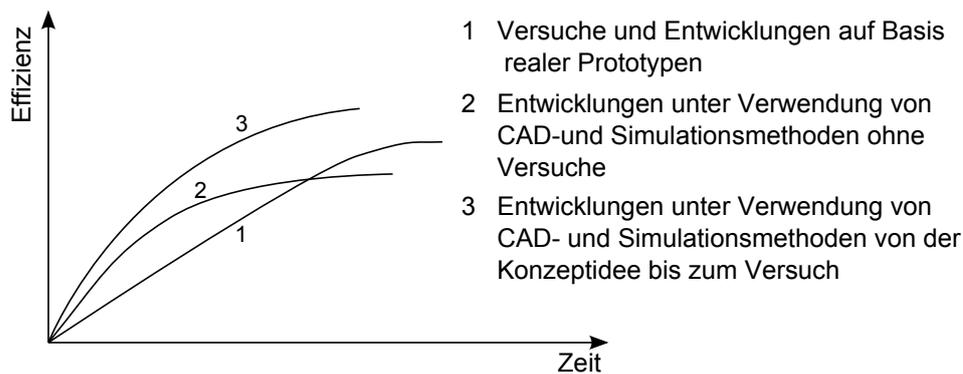


Abb. 2.5: Effiziente Entwicklung durch konsequenten Einsatz von Simulationenmethoden im Entwicklungsprozess nach Sisca u. a. (2008)

## 2.3 Beschreibung des Gesamtsystems Virtuelles Fahrerplatzmodell

Im vorangehenden Abschnitt wurde das Potenzial einer VR-Methodik dargestellt, dessen Anforderungen auf die Ergonomiekonzeptentwicklung eines Fahrzeuginterieurs zugeschnitten sind. Der in dieser Arbeit beschriebene Aufbau eines virtuellen Fahrerplatzmodells zur Untersuchung ergonomischer Fragestellungen soll die Vorteile der vorgestellten bisherigen Ansätze aufweisen und gleichzeitig deren wesentliche Nachteile vermeiden. Um diesen Anforderungen in Konzipierung und Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells gerecht zu werden, müssen zunächst die zu simulierenden Stimuli näher betrachtet werden. Danach werden in einem zusammenfassenden Überblick die grundsätzlichen Komponenten von VR-Systemen vorgestellt, um daraus schließlich den Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells abzuleiten und detailliert zu beschreiben.

### 2.3.1 Multisensorische Reize

Das bereits dargestellte Wirkgefüge zwischen den menschlichen Sinneskanälen und der virtuellen Umgebung (siehe Abbildung 2.1) gibt einen ersten Anhaltspunkt über die Komplexität der menschlichen Wahrnehmung. Im Nachfolgenden soll als Grundlage für die folgenden Kapitel kurz auf diejenigen Arten der Sinneswahrnehmung eingegangen werden, welche für die konzeptionelle Auslegung der wesentlichen Komponenten des virtuellen Fahrerplatzmodells eine entscheidende Rolle spielen: das Sehen und der Berührungssinn. Für die weiteren Sinne, die nach dem heutigen Stand der Technik nicht ausreichend virtuell simuliert werden können (Riechen, Schmecken) oder für die Anforderungen des variablen Fahrerplatzmodells nur eine untergeordnete Rolle spielen (Hören, Gleichgewichtssinn) soll an dieser Stelle auf umfassende Darstellungen u.a. bei Schrader (2003) oder Brockhaus (1997) verwiesen werden.

#### Sehen - visuelles rezeptorisches System

Der visuelle Sinneskanal spielt nicht nur bei der Wahrnehmung der realen Umgebung eine wichtige Rolle. Auch in der *Virtuellen Realität* ist heute die visuelle Simulation, d.h. die Übertragung visueller Informationen ein zentrales Element. Im Folgenden sollen nun der grundsätzliche Aufbau des menschlichen visuellen rezeptorischen Systems dargestellt werden, soweit dies zum Verständnis der folgenden Inhalte dieser Arbeit nötig ist. Die wesentlichen Prinzipien visueller Wahrnehmung gelten in einer virtuellen Umgebung gleichwie in einer realen Umgebung, allerdings gibt es ebenfalls einige Unterschiede. Diese betreffen vor allem die Tiefenwahrnehmung in der virtuellen Umgebung. Aus diesem Grund werden im Anschluss die zugrundeliegenden Mechanismen dieses Wahrnehmungsaspekts erläutert.

Das visuelle rezeptorische System des Menschen ist folgendermaßen aufgebaut: Die Augen als eigentliches rezeptorisches Organ nehmen Informationen aus der Umwelt in Form von elektromagnetischer Strahlung auf und übertragen diese Informationen über

die beiden Sehnerven an verschiedene Bereiche des Gehirns in und unterhalb der Großhirnrinde (Hofmann, 2002). Das für den Menschen sichtbare Spektrum der elektromagnetischen Strahlung umfasst dabei den Wellenlängenbereich von ca 380nm bis 760nm (violett bis rot). Den anatomischen Aufbau des menschlichen Auges zeigt Abbildung 2.6.

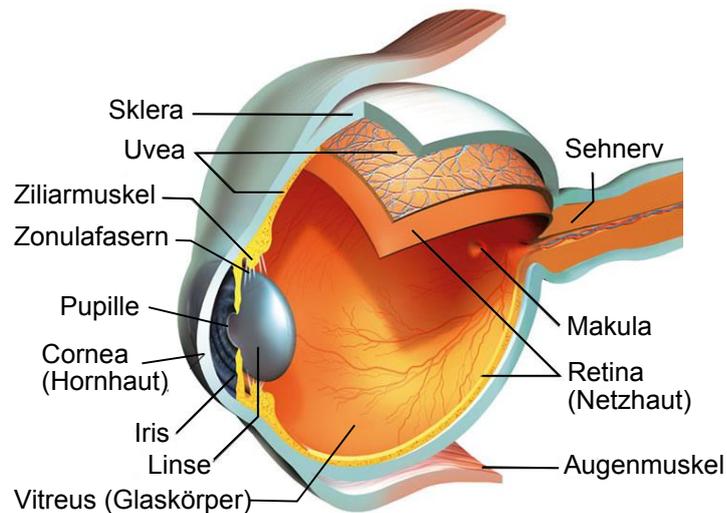


Abb. 2.6: Anatomischer Aufbau des menschlichen Auges (angelehnt an Becker, 2010)

Das Licht wird durch Pupille und Linse auf die Netzhaut geleitet und steht dort als zweidimensionales Erregungsmuster zur Verfügung, welches in Form von elektrischen Impulsen an das Gehirn weitergeleitet wird. Dabei passt sich das Auge im Wesentlichen durch drei verschiedene Mechanismen ständig an die gegebenen Verhältnisse der Umgebung an: die eigentliche Augenbewegung durch die zugehörigen Muskeln am Auge, die Fokussierung des Abbilds eines anvisierten Objekts auf der Netzhaut, genannt Akkomodation, und die Anpassung an die Lichtverhältnisse.

Bei der Fixierung eines Objekts werden die Augen entweder gleichförmig oder gegenläufig um verschiedene Achsen gedreht. Als Konvergenzbewegung wird hierbei ein gegenläufiges Verdrehen der Augen bezeichnet, welches dazu dient, das betrachtete Objekt im Nahsichtbereich auf der Makula, dem Teil der Netzhaut mit der größten Dichte von Sehzellen, abzubilden. In diesem auch als *Gelber Fleck* bezeichneten Bereich befinden sich hauptsächlich die zur Farbwahrnehmung wichtigen Sehzellen, sogenannte Zapfen. Das Auflösungsvermögen des Auges liegt für die Unterscheidung zweier Farbtöne bei einer Wellenlänge von 2nm bis 10nm (abhängig vom Wellenlängenbereich des Farbtönen).

Das räumliche Auflösungsvermögen der Augen bezeichnet die Fähigkeit zwei Punkte eines Objekts gerade noch als getrennt wahrzunehmen. Allgemein wird hierfür beim Menschen ein Auflösungsvermögen von etwa einer Bogenminute angenommen (Schraeder, 2003). Durch den Mechanismus der Akkomodation wird das Bild auf der Makula fokussiert, hierbei wird die Linse durch den Ziliarmuskel verformt und dabei die Brennweite der Linse angepasst. Die Lichtbrechung erfolgt dabei etwa im Verhältnis 2:1 an der Grenzfläche Umgebungsluft zu Hornhaut und in der Linse selbst (Hofmann, 2002). Scharfes Sehen findet nur im Bereich der Makula statt, im übrigen Bereich spricht man von

peripherem oder unscharfem Sehen. Die Sehschärfe ist nach Hofmann (2002) direkt mit der sogenannten Tiefenschärfe verknüpft, darunter versteht man das Entfernungintervall um die fokussierte Distanz, das noch scharf abgebildet wird. Die Verengung der Iris bewirkt eine Vergrößerung der Schärfentiefe. Außerdem ist die Sehschärfe proportional zur Luminanz<sup>8</sup> der betrachteten Umgebung. Das Auge ist in der Lage, sich sehr schnell an veränderte Lichtverhältnisse einzustellen, indem durch eine Veränderung der Pupille die Lichtintensität auf der Netzhaut angepasst wird. Bei zunehmender Helligkeit verengt sich die Pupille und bei Dunkelheit weitet sie sich. Bei schlechten Lichtverhältnissen sind nur noch die Sehzellen zur Unterscheidung von hell und dunkel, sogenannte Stäbchen, in der Lage einfallende Lichtwellen wahrzunehmen.

Beim zeitlichen Auflösungsvermögen der Augen spielt die Flimmerfusionsfrequenz eine entscheidende Rolle. Heutige Grafikdisplays stellen Einzelbilder in einer sehr schnellen Abfolge dar. Die Flimmerfusionsfrequenz ist dabei jene Frequenz, ab der das Auge die einzelnen Bilder als kontinuierliche Abfolge wahrnimmt. Diese Frequenz ist abhängig von der Luminanz und liegt für heutige Grafikdisplays in einem Bereich zwischen 60 und 70 Hz.

Unter dem binokularen Sehfeld versteht man den Bereich, der ohne Bewegung der Augen erfasst werden kann. Es hat in horizontaler Richtung eine Ausdehnung von etwa 170-180°, in vertikaler Richtung etwa 110-120°. Ein einzelnes Auge besitzt ein horizontales Sehfeld von etwa 150°, die Sehfelder der beiden Augen überlappen sich in der Mitte um ca. 120° (Youngblut u. a., 1996). Im Gegensatz zum Sehfeld bezeichnet das Blickfeld den Bereich, der mit einer Augenbewegung wahrgenommen werden kann, er umfasst eine Ausdehnung von 270-290° horizontal und 190° vertikal (Schrader, 2003).

### Visuelle Raumwahrnehmung

In den in dieser Arbeit durchgeführten Studien spielt die korrekte visuelle Raum- und Größenwahrnehmung des Fahrzeuginterieurs eine grundlegende Rolle. Aus diesem Grund soll im folgenden Abschnitt auf die Zusammenhänge der visuellen Raumwahrnehmung eingegangen werden, um die Einschränkungen des Versuchsaufbaus und der virtuellen Umgebung besser zu verstehen.

Die räumliche Wahrnehmung eines Raumes setzt sich dabei aus zwei Prozessen zusammen: der Wahrnehmung der absoluten Entfernung der Teilobjekte des Raumes vom Betrachter aus (egozentrische Entfernung) und der Wahrnehmung der Entfernung verschiedener Teilobjekte des Raumes voneinander (exozentrische Tiefe) (Hofmann, 2002). Derselbe Autor stellt hierzu fest, dass der „bestimmende Parameter für die Wahrnehmung der Größe des Fahrzeugcockpits ... die wahrgenommene absolute Entfernung zu seinen Innenflächen“ ist. Der exozentrischen Tiefe wird ein unterstützender Beitrag zugeschrieben.

Tabelle 2.1 zeigt die wesentlichen Mechanismen und Informationsquellen der visuellen Raumwahrnehmung geordnet nach monokularen<sup>9</sup> und binokularen Kriterien. Die

<sup>8</sup>Luminanz = fotometrisches Maß für die Helligkeit oder Leuchtdichte

<sup>9</sup>monokular bezeichnet hier die Wahrnehmung mit einem Auge, binokular kann folglich mit der beidäugigen Wahrnehmung gleichgesetzt werden

wichtigsten werden an dieser Stelle kurz erläutert und eventuelle Wechselwirkungen aufgezeigt.

### Monokulare Tiefenkriterien

<i>Informationsquelle</i>	<i>Art der Information</i>
Akkomodation	auf kurze bis mittlere Entfernungen Information über exozentrische Tiefe (ordinal). Auf kurze Distanzen Information über absolute Entfernung (metrisch)
Bewegungsparallaxe	Information über exozentrische Tiefe. Zusätzlich Information über absolute Entfernung durch absolute Bewegungsparallaxe.
Verdeckungen	Information über exozentrische Tiefe (ordinal).
Relative Größe	Information über exozentrische Tiefe (metrisch).
Relative opt. Dichte	Information über exozentrische Tiefe (metrisch).
weitere <sup>10</sup>	nur Information über exozentrische Tiefe

### Binokulare Tiefenkriterien

<i>Informationsquelle</i>	<i>Art der Information</i>
Binokulare Disparität	Information über die exozentrische Tiefe (mit Zusatzinformation metrisch) u.U. auch Information über absolute Entfernung (metrisch; durch vertikale Disparation)
Konvergenz	Auf kurze bis mittlere Entfernung Information über exozentrische Tiefe (ordinal). Auf kurze Distanzen Information über absolute Entfernung (metrisch)

Tab. 2.1: Monokulare und Binokulare Tiefenkriterien (angelehnt an Hofmann, 2002)

Die vom linken und rechten Auge wahrgenommenen Bilder unterscheiden sich, aus diesem Unterschied entsteht subjektiv der Eindruck räumlicher Tiefe. Genauer betrachtet bedeutet dies, dass die Projektion zweier Punkte der Umgebung in unterschiedlicher Tiefe zu Projektionen auf der Netzhaut beider Augen führen, die zunächst scheinbar nicht korrespondieren. Abbildung 2.7 zeigt die Zusammenhänge, die zum Verständnis dieses als **binokulare Disparität** bezeichneten Mechanismus notwendig sind. Beim Fixieren

<sup>10</sup>Die weiteren monokularen Informationsquellen dienen nur der Wahrnehmung exozentrischer Tiefe. Insbesondere werden hier in der Fachliteratur die Folgenden erwähnt: relative Helligkeit, Höhe im Gesichtsfeld, lineare Perspektive, atmosphärische Perspektive, kinetische Tiefe. Sie sind u.a. bei Hofmann (2002) ausführlich dargestellt.

des Punktes A in der Umgebung verdreht der Mensch seine beiden Augen gegeneinander, dabei wird  $\Phi$  als Konvergenzwinkel bezeichnet. Die Position der Projektionen des Punktes B auf der Netzhaut  $b_R$  (im rechten Auge) und  $b_L$  (im linken Auge) unterscheiden sich nun relativ zur Position der jeweiligen Projektionen des Punktes A ( $a_R$  und  $a_L$ ). Die Differenz der beiden Winkel zwischen  $b_R$  und  $a_R$  ( $\delta_R$ ) sowie  $b_L$  und  $a_L$  ( $\delta_L$ ) wird als Querdisparation  $\delta$  oder horizontale binokulare Disparität bezeichnet. Ist nun aus einer anderen Informationsquelle die absolute Entfernung zu einem der beiden Punkte bekannt kann aus der Querdisparation  $\delta$  auf die exozentrische Tiefe zwischen A und B rückgeschlossen werden.

Abbildung 2.7 stellt ebenfalls dar, wie in einer VR-Simulation die stereoskopische Darstellung der räumlichen Umgebung erfolgt. Dem linken und rechten Auge werden unterschiedliche Projektionen der Szene auf der Bildelebene gezeigt. Die Distanz der Projektionen eines Punktes auf der Bildelebene wird als Bildschirm-Parallaxe bezeichnet. Man spricht von einer negativen Parallaxe, wenn sich die beiden Sichtstrahlen vor der Bildelebene kreuzen, dies ist der Fall bei Punkt B, der räumlich vor der Bildelebene liegt. Punkt A liegt hinter der Bildelebene, dies entspricht einer positiven Parallaxe.

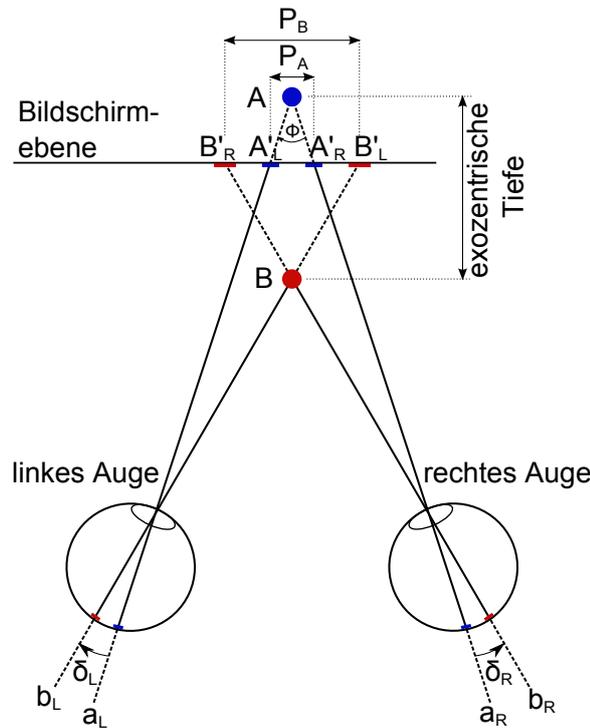


Abb. 2.7: Binokulare Disparität und positive sowie negative Parallaxe

Zusätzlich steht eine absolute Entfernungsinformation durch die vertikale Disparität zur Verfügung (Mathews u. a., 2003). Hierbei geht es um das vertikale Größenverhältnis  $\Lambda$  der Projektionen auf den Netzhäuten des linken und rechten Auges. Dieses Verhältnis wächst linear mit dem horizontalen Differenzwinkel  $\gamma$  zwischen Blickrichtung und dem

Lot auf die Verbindungslinie der beiden Augen. Nach Hofmann (2002) wird die Steigung der Funktion  $\Lambda = f(\gamma)$  mit der absoluten Entfernung des Objektes zum Betrachter kleiner, womit diese Steigung eine Informationsquelle für die absolute Entfernung darstellt.

Als Informationsquelle zur absoluten Entfernungsabschätzung dient wie bereits erwähnt, das gegenläufige Ein- und Ausdrehen der beiden Augen, d.h. die Augen konvergieren oder divergieren. Mit diesem als **Konvergenz** bezeichneten Vorgang ist es möglich, Punkte in verschiedenen Entfernungen zu fixieren. Der Konvergenzwinkel  $\Phi$  lässt dabei einen direkten Rückschluss auf die Entfernung zu dem fixierten Objekt zu (vgl. Abbildung 2.7). Dieser Mechanismus beruht auf der Bewegung beider Augen und wird folglich den binokularen Informationsquellen der Tiefenwahrnehmung zugeordnet. Auch die **Akkommodation** kann nach Cutting u. Vishton (1995) als direktes Maß für die absolute Entfernung zu einem Objekt bezeichnet werden. Hierbei passt sich das Auge durch eine Veränderung der Linsenkrümmung an die Entfernung zum fixierten Objekt an, um das Bild mit maximaler Abbildungsschärfe auf der Netzhaut darzustellen. Die Akkommodation ist ein monokulares Tiefenkriterium. Zusätzlich gibt es noch eine starke gegenseitige Beeinflussung von Akkommodation und Konvergenz. Dabei bewirkt das Scharfstellen auf ein nahes Objekt (Nahakkommodation) eine Konvergenzbewegung der Augen, bei einem fernen Objekt (Fernakkommodation) reagieren die Augen mit einer Divergenzbewegung.

Unter einer **Bewegungsparallaxe** versteht man folgenden Zusammenhang: Bei der Bewegung eines Betrachters verschieben sich die Netzhautabbilder zweier Objekte in unterschiedlicher Entfernung zum Betrachter gegeneinander. Ebenso können natürlich auch sich bewegende Objekte in unterschiedlicher Entfernung bei einem statischen Betrachter sich gegeneinander verschiebende Abbilder erzeugen. Die Bewegungsparallaxe liefert vor allem Informationen über die exozentrische Tiefe zweier Objekte. Eine absolute Entfernung zu einem Objekt lässt sich nach (Hofmann, 2002) durch den Mechanismus der absoluten Bewegungsparallaxe abschätzen. Dabei bewegt sich der Betrachter seitwärts zu einem direkt vor ihm befindlichen Objekt und kann durch die ihm bekannte Geschwindigkeit der Seitwärtsbewegung und der Winkelgeschwindigkeit, mit der er seine Blickrichtung auf das Objekt ändert, abschätzen, wie weit er von dem Objekt entfernt ist.

Die **Verdeckung** eines Objektes durch ein anderes ist eine ordinale Information über die Entfernung des Betrachters zu beiden Objekten. Damit lassen sich zwar theoretisch auch beliebig kleine Entfernungsunterschiede zwischen zwei Objekten zuordnen, allerdings stehen durch die Verdeckung keine Informationen über die absolute Entfernung der beiden Objekte vom Betrachter zur Verfügung.

Als relative Größe bezeichnet man das Größenverhältnis der Netzhautabbildungen zweier gleichgroßer Objekte in unterschiedlicher Entfernung, aus dem sich die Entfernung der beiden Objekte voneinander ableiten lässt. Da aber ein bestimmtes Größenverhältnis zweier Netzhautabbildungen verschiedenen Abständen zweier Objekte in unterschiedlichen Entfernungen entsprechen kann, werden zusätzliche Informationen, wie die absolute Entfernung zu einem der Objekte oder eine bekannte absolute Objektgröße benötigt. Die Größe des Netzhautabbilds eines Objekts kann einen Rückschluss auf die absolute Entfernung zu dem Objekt geben, wenn die tatsächliche Größe des Objekts aus Erfahrung bekannt ist.

Die relative optische Dichte als Informationsquelle für exozentrische Tiefe beschreibt das Dichteverhältnis der Netzhautabbildungen zweier Objekte in unterschiedlichen Entfernungen mit gleicher Textur.

In der Literatur werden verschiedene Modelle zur Integration der vorgestellten Informationsquellen in eine gesamtheitliche Tiefenwahrnehmung beschrieben. Dies ist notwendig, da nicht immer alle Informationsquellen in ausreichendem Maße verfügbar sind. Diese Modelle unterscheiden sich vor allem im angenommenen Grad der Wechselwirkung der einzelnen Informationsquellen und deren Gewichtung. Nagata (1991), Fine u. Jacobs (1999), Landy u. a. (1995), Cutting u. Vishton (1995) und Hofmann (2002) vergleichen in ihren Arbeiten diesbezüglich verschiedene Modelle und favorisieren dabei das im Folgenden kurz vorgestellte Modell der modifizierten schwachen Integration: Zunächst werden hierbei die Tiefeninformationen aus den einzelnen Informationsquellen unabhängig voneinander gewonnen. Anschließend erfolgt ein Interaktionsprozess der verschiedenen Quellen, bei dem die Tiefeninformationen aller Quellen auf ein metrisches Niveau angehoben werden. Für die so gewonnenen Tiefeninformationen werden nun Verlässlichkeiten<sup>11</sup> für die einzelnen Quellen ermittelt, um dann im letzten Schritt aus den Informationen der einzelnen Quellen einen gewichteten Mittelwert zu bilden. Die Gewichtung wird dabei aus den Verlässlichkeiten abgeleitet.

Nagata (1991) und Cutting u. Vishton (1995) erweitern dieses Modell mit einer Darstellung zur entfernungsabhängigen Gewichtung der einzelnen Informationsquellen. Abbildung 2.8 zeigt dieses Modell, indem die normierten Wahrnehmungsschwellen der gerade beschriebenen Informationsquellen zur Tiefenwahrnehmung in Abhängigkeit von der absoluten Entfernung zwischen Betrachter und den beiden Objekten aufgetragen sind. Cutting u. Vishton (1995) halten Wahrnehmungsschwellen, die größer als 10 Prozent sind, für uneffektiv bei der Tiefenwahrnehmung. Nach Cutting u. Vishton (1995) lässt sich aus dem Vergleich der normierten Wahrnehmungsschwellen die Gewichtung der Informationsquellen zur Tiefenwahrnehmung ableiten. Hierbei ist eine umso kleinere Wahrnehmungsschwelle mit einer umso größeren Gewichtung gleichzusetzen. Folglich beschreibt der in Abbildung 2.8 markierte Bereich die im Fahrzeuginterieur effektiv verwendbaren Informationsquellen zur Tiefenwahrnehmung mit einer entfernungsabhängigen relativen Gewichtung der einzelnen Mechanismen.

Desweiteren stellt Hofmann (2002) fest, dass sich das Wahrnehmungssystem des Menschen an seine spezifische Umgebung anpasst. Somit ist es durchaus möglich, dass verschiedene Menschen die Informationsquellen unterschiedlich gewichten, je nach ihren individuellen Erfahrungen und Präferenzen, was wiederum zu einer unterschiedlichen Raumwahrnehmung führen kann.

Eine korrekte Entfernungs- oder Tiefenwahrnehmung ist die Basis für eine korrekte Größenwahrnehmung. Die Größe eines Objekts wird primär über die Größe der Netzhautabbildung wahrgenommen. Allerdings wird die Größe der Netzhautabbildung auch direkt durch die Entfernung zu einem Objekt beeinflusst. Je weiter sich der Betrachter von einem Objekt entfernt, desto kleiner wird die entsprechende Netzhautprojektion.

---

<sup>11</sup>Die Verlässlichkeiten einer Informationsquelle werden durch ihre Verfügbarkeit, die Entfernungsabhängigkeit ihrer Effektivität und weitere Zusatzinformationen bestimmt (Landy u. a., 1995)

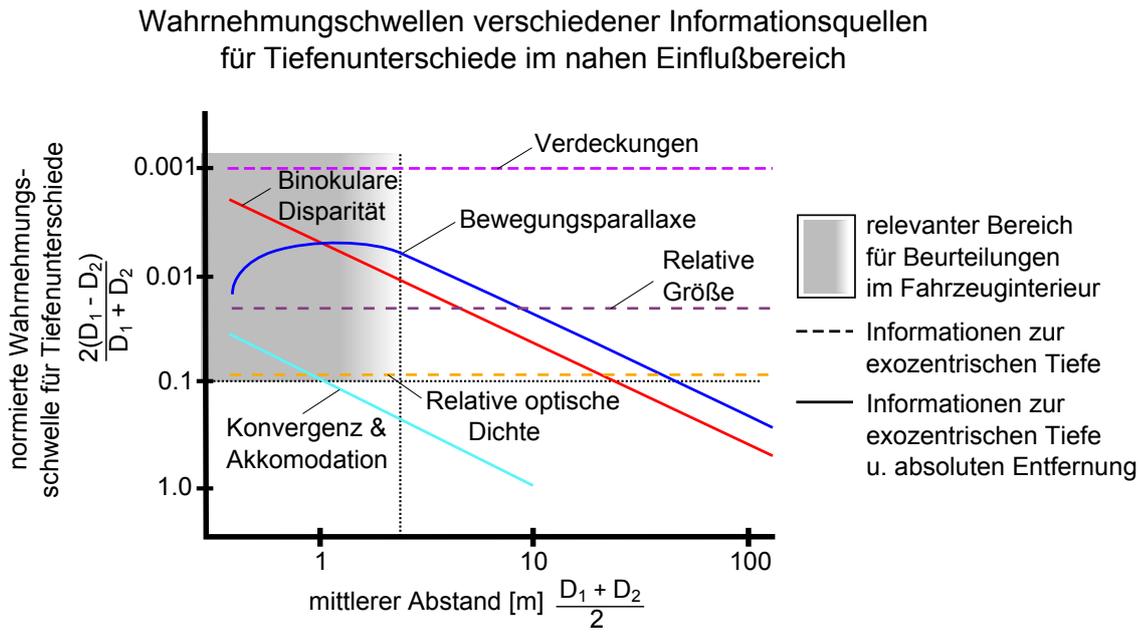


Abb. 2.8: Entfernungsabhängige Wahrnehmungsschwellen der Informationsquellen zur Tiefenwahrnehmung im direkten, überwiegend haptisch erreichbaren Einflussbereich (angelehnt an Cutting u. Vishton, 1995).  $D_1$  und  $D_2$  sind hierbei die Entfernungen zu den beiden zu vergleichenden Objekten. Die normierte ordinale Wahrnehmungsschwelle errechnet sich aus der Differenz der beiden Abstände  $D_1$  und  $D_2$  im Verhältnis zum mittleren Abstand

Abbildung 2.9 zeigt, dass die Größe der Netzhautabbildung von Objekten, die den gleichen Sehwinkel einnehmen, gleich groß sind. Objekte mit identischem Sehwinkel können unterschiedliche Größe in verschiedenen Entfernungen aufweisen. Dieser Effekt wird als Größen-Entfernungs-Invarianzeffekt bezeichnet (Hofmann, 2002). Damit nun eine korrekte Größenwahrnehmung möglich ist, müssen die Informationen zu Entfernung und Größe kombiniert werden. Nach Gillam (1995) werden hierzu vorrangig die Mechanismen der Akkomodation und Konvergenz eingesetzt.

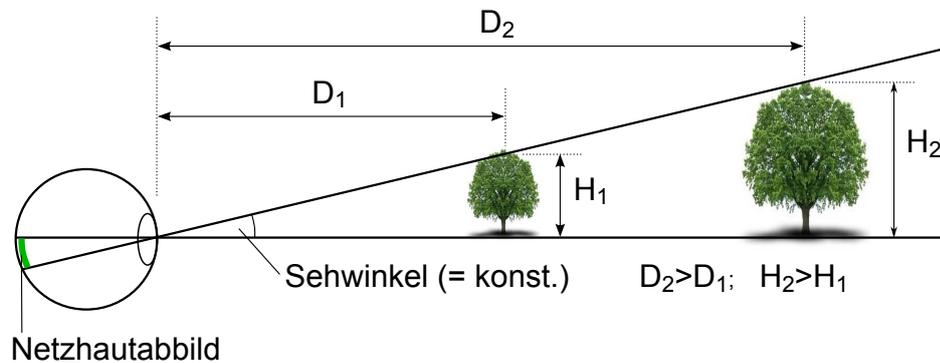


Abb. 2.9: Größen-Entfernungs-Invarianzeffekt: Gleichbleibende Größe der Netzhautabbildung bei Objekten unterschiedlicher Größe und Entfernung mit konstantem Sehwinkel

### Berührungssinn - haptisches rezeptorisches System

Im folgenden Abschnitt wird der grundsätzliche Aufbau des haptischen rezeptorischen Systems des Menschen erläutert, soweit dies für das Verständnis der weiteren Zusammenhänge nötig ist. Der Berührungssinn des Menschen lässt sich in zwei Bereiche gliedern: die Oberflächensensibilität, welche die Wahrnehmung von Reizen direkt über die Haut umfasst, und die Tiefensensibilität, welche die Wahrnehmung von Reizen über das Körperinnere bezeichnet.

Die Tiefensensibilität, auch als Propriozeption bezeichnet, versetzt den Menschen in die Lage kinästhetische Reize über Rezeptoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken aufzunehmen. Die Tiefensensibilität umfasst dabei den Lagesinn, den Kraftsinn und den Bewegungssinn. Diese dienen der Eigenwahrnehmung des Zustands eines Körperteils, beispielsweise der Stellung eines Gelenks, dem Spannungszustand von Muskeln und Sehnen oder dem Erkennen von Bewegungsrichtungen. Exemplarisch können als spezifische Rezeptoren die Muskelspindeln für Informationen zur Muskellänge oder Golgi-Sehnenorgane für Informationen zur Muskelspannung angeführt werden.

Unter der Oberflächensensibilität versteht man die Wahrnehmung von Reizen über Rezeptoren, die sich in der Haut befinden. Neben Thermo- und Schmerzrezeptoren<sup>12</sup>

<sup>12</sup>Temperatur, Schmerz und Juckreize werden von freien Nervenenden im Bereich der Dermis und Epidermis wahrgenommen

sind hier die Mechanorezeptoren anzuführen, diese dienen dem Erkennen von Druck, Berührung und Vibrationen. Diese Wahrnehmung mechanischer Effekte wird als taktile Wahrnehmung bezeichnet. Die Mechanorezeptoren zur taktilen Wahrnehmung verteilen sich auf zwei Hautschichten: In und direkt unter der Epidermis befinden sich die Rezeptoren zur Druck und Geschwindigkeit, eine Schicht tiefer in der Dermis sind die Rezeptoren zur Wahrnehmung von Vibration und Dehnung. Abbildung 2.10 zeigt schematisch einen Schnitt durch diese Hautschichten sowie die Anordnung und anatomische Bezeichnung der unterschiedlichen Rezeptoren.

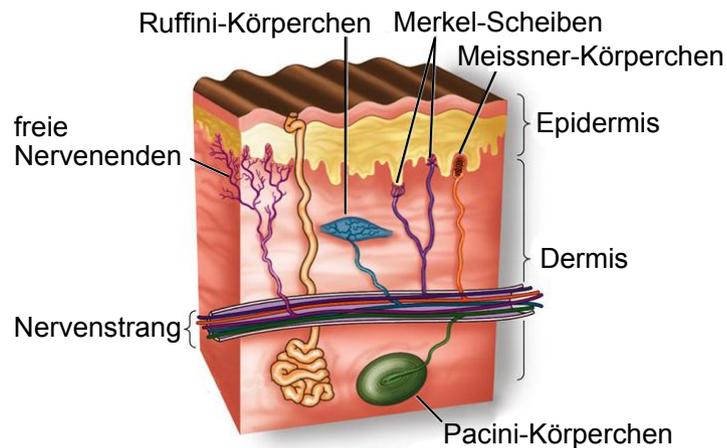


Abb. 2.10: Anatomischer Aufbau der menschlichen Haut (angelehnt an Sadava u. a., 2007)

Tabelle 2.2 fasst die wesentlichen Daten zu den verschiedenen Mechanorezeptoren zusammen.

### Mechanorezeptoren der Haut

Rezeptor	Information	Adaption	rezeptiver Bereich	räuml. Auflösung
Meissner-Körperchen <sup>13</sup>	Geschwindigkeit	schnell	13mm <sup>2</sup>	schlecht
Pacini-Körperchen	Vibration	sehr schnell	101mm <sup>2</sup>	sehr schlecht
Merkel-Tastscheiben	Druck	langsam	11mm <sup>2</sup>	gut
Ruffini-Körperchen	Dehnung	langsam	59mm <sup>2</sup>	mittel

Tab. 2.2: Übersicht zu den Mechanorezeptoren der Haut (angelehnt an Schrader, 2003)

Für eine ausführliche Darstellung der geschilderten Zusammenhänge sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen, z.B. Sadava u. a. (2007). Informationen aus der kinästhetischen und der taktilen Wahrnehmung werden im Regelfall nur schwer getrennt

<sup>13</sup>Die Meissner Körperchen kommen nur in unbehaarter Haut vor, z.B. an den Handinnenflächen, bei behaarter Haut übernehmen Sinneszellen in den Haarfollikel ihre Funktion.

voneinander wahrgenommen, so wird bei nahezu allen Bewegungen auch das taktile System angesprochen.

Der Berührungssinn dient neben der Wahrnehmung von Gegenständen und ihrer räumlichen Anordnung bei schlechter Sicht auch der Identifikation von Materialien und ihrer Oberflächeneigenschaften. Er verteilt sich über den ganzen Körper. Zur hohen Bedeutung der haptischen Wahrnehmung stellt Zwisler (1998) fest, dass sich diese am besten beim Nichtvorhandensein erfahren lässt. Präzise Manipulationen fallen bei großer Kälte sehr schwer, da das haptische System hier sehr unempfindlich wird.

### Wechselwirkungen der multimodalen Wahrnehmung

Im Gegensatz zur getrennten Betrachtung in den vorangehenden Kapiteln arbeiten die menschlichen Sinneskanäle keineswegs unabhängig voneinander. Es müssen somit verschiedene Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Nach Ernst (2001) sind die meisten Interaktionen zwischen haptischem und visuellem rezeptorischem System auf Objekteigenschaften zurückzuführen, die für beide Systeme direkt zugänglich sind, siehe Abbildung 2.11. Diese umfassen insbesondere räumliche Informationen eines Objekts wie Größe, Form, Position oder Orientierung. Greifen wir ein bestimmtes Objekt, so werden die Informationen aus den visuellen und haptischen Sinneskanälen im Gehirn zu einer mentalen Repräsentation dieses Objekts integriert. Es kann nun z.B. in einer Simulation vorkommen, dass die Informationen über ein Objekt aus den verschiedenen Sinneskanälen nicht übereinstimmen. Passiert dies, setzen Adaptions- und Rekalibrationsmechanismen ein. Ernst (2001) stellt fest, dass derartige visuomotorische Konflikte häufig nicht bewusst wahrgenommen werden und definiert zugehörige Wahrnehmungsschwellen. Er konnte aufzeigen, dass man beim Hantieren mit Objekten primär auf drei Informationsquellen zurückgreift: die visuelle und haptische Wahrnehmung sowie die mentale Objektrepräsentation, die das menschliche Gehirn flexibel und effizient kombiniert. Als Ziel für das virtuelle Fahrerplatzmodell lässt sich daraus eine vollimmersive Simulation visueller und haptischer Inhalte ableiten.

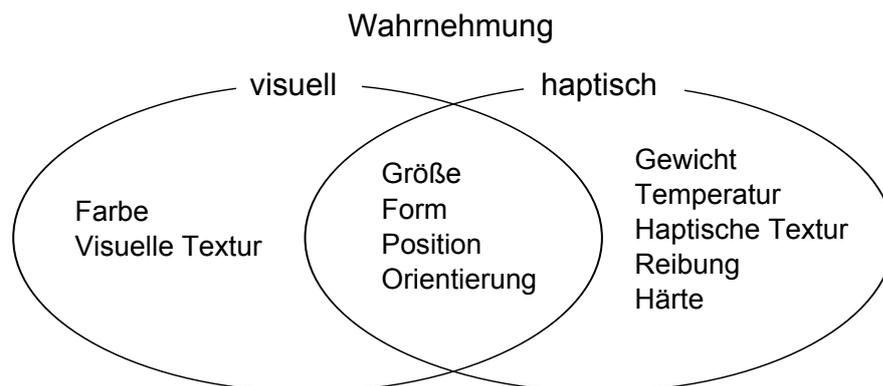


Abb. 2.11: Physikalische Objekteigenschaften, die vom visuellen oder haptischen rezeptuellen System wahrgenommen werden können (angelehnt an Ernst, 2001).

Wie bereits dargestellt, basieren VR-Simulationen auf der Darstellung künstlicher, vom Computer generierter Sinnesreize. Diese Simulation ist einerseits von den Aktionen des Nutzers abhängig, kann aber auch durch interne Aktionen beeinflusst werden. Ersteres setzt voraus, dass alle Aktionen des Anwenders, die zu einer Änderung der Darstellung führen können, ständig ausgewertet werden und gleichzeitig die Darstellung kontinuierlich an diese Aktionen angepasst wird. Für diesen Zusammenhang, von Schrader (2003) auch als Display-Detection-Model bezeichnet, spielen zwei Faktoren eine entscheidende Rolle: die Wiederholrate und die Latenz.

Die Wiederholrate bezeichnet die Frequenz, in der der Prozess der Auswertung der Nutzeraktionen und die Anpassung der Darstellung durchgeführt werden. Eine steigende Komplexität der Simulation und somit auch der Darstellung vermindert die Wiederholrate. Steigern lässt sich die Wiederholrate durch eine verbesserte Rechenleistung der Simulationsrechner. Typische Frequenzbereiche menschlicher Bewegung betragen nach Schrader (2003) für eine Kopfbewegung ca. 0,5 - 7 Hz und für eine Handbewegung ca. 2 Hz. Diese Nutzerbewegungen stellen in der Betrachtungsweise der Signaltheorie kontinuierliche Signale dar. Setzt man voraus, dass die Darstellung in der VR-Simulation diskret erfolgt, lässt sich aus dem Shannonschem Abtasttheorem (Schmid, 1995) folgern, dass das kontinuierliche Signal vollständig charakterisiert ist, wenn das Signal mit der doppelten Frequenz des höchsten Frequenzanteils abgetastet wird. Bei einer Unterschreitung dieser Abtastrate können sogenannte Aliasingeffekte auftreten, d.h. die Simulation erscheint dem Nutzer abgehackt als Folge diskreter Darstellungen und nicht mehr kontinuierlich.

Unter dem zweiten zeitlichen Faktor, der Latenz, versteht man die Zeit die zwischen der Erfassung einer Nutzeraktion und der entsprechenden Reaktion der Simulation oder Darstellung vergeht. Je höher diese Verzögerung ist, desto ungenauer erscheint die Simulation für den Anwender. Als Empfehlung für Latenzzeiten in VR-Simulationen gibt Schrader (2003) einen Wert kleiner 100ms an.

In anderen Quellen werden hierzu ähnlich Werte für die Latenzzeit angegeben. Sie sollte nach Bokranz u. Landau (2006) nicht größer als 70 ms (menschlicher kognitiver Verarbeitungszyklus) sein, wobei sie bei typischen Systemen zwischen 60 und 180 ms beträgt (Rolland u. Fuchs, 2001).

Als ein weiterer wichtiger Aspekt im Bezug auf die menschliche Wahrnehmung ist dessen Anpassung an seine Umgebung zu sehen. Schrader (2003) führt hierzu u.a. folgendes Beispiele an. Beim Aufsetzen einer Brille mit veränderter Dioptrinzahl braucht der Wahrnehmungsapparat ein gewisse Zeit um sich an die veränderte visuelle Wahrnehmung zu gewöhnen. Im ersten Moment können dabei in der Wahrnehmung Unterschiede zwischen den visuell aufgenommenen Informationen und den Informationen aus dem Gleichgewichtssinn entstehen, auf dieses Phänomen reagieren manche Menschen mit Symptomen ähnlich der Seekrankheit. Auch aus dem Bereich der VR-Simulationen mit ihren spezifischen Wahrnehmungsmechanismen sind entsprechende Mechanismen bekannt und werden allgemein als Simulatorkrankheit bezeichnet (Reason, 1978). Die multimodale Wahrnehmung des Menschen gleicht dabei gewisse Unvollkommenheiten der VR-Simulation aus. Ein Adaptionsprozess setzt ein, während dessen bei den Anwendern die Simulatorkrankheit mit ähnlichen Symptomen wie bei der Seekrankheit

auftreten kann (Duh u. a., 2004; Schrader, 2003). Treten die Unvollkommenheiten in der Simulation hingegen sehr stark und deutlich hervor, führt dies eher zur Ablehnung der VR-Simulation. Ob die Simulatorkrankheit während der Benutzung der Simulation auftritt und welche Symptome sich einstellen, ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich. Die Erfahrung mit dem VR-System virtuelles Fahrerplatzmodell zeigt außerdem, dass Anwender tagesformabhängig manchmal mehr und manchmal weniger zur Simulatorkrankheit neigen. Hier spielen die Inhalte bzw. in der Simulation gestellten Aufgaben ebenso eine Rolle (Stoffregen u. a., 2008) wie individuelle Faktoren beim Anwender wie Stress, Müdigkeit oder Gesundheitszustand. Bei der Evaluierung des virtuellen Fahrerplatzmodells werden die Auswirkungen der Simulatorkrankheit mittels Fragebogen ermittelt, analog zum Vorgehen bei Voß (2008). Desweiteren sollen an dieser Stelle auch die Ergebnisse von Stoffregen u. a. (2008) kurz angesprochen werden. Die Autoren stellen dabei fest, dass die Simulatorkrankheit häufig mit einer Veränderung der Stabilität in der Körper- bzw. Kopfhaltung einhergeht. Ähnliche physiologische Anzeichen wie ein leichtes Schwitzen sind ebenfalls als früh von außen sichtbare Merkmale der Simulatorkrankheit bekannt. Allgemein sollten daher Anwender von VR-Systemen vor Beginn der Simulation auf eine mögliche Simulatorkrankheit hingewiesen werden, mit der expliziten Anweisung bei ersten Anzeichen der Simulatorkrankheit Bescheid zu geben und gegebenenfalls die Simulation zu unterbrechen.

### 2.3.2 Grundsätzlicher Aufbau eines Virtual Reality Systems

Im folgenden Abschnitt sollen kurz die wesentlichen Komponenten von VR-Systemen dargestellt werden, um dann den Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells als Werkzeug und Grundlage für die durchgeführten Versuche im Detail zu verstehen. Nach Schrader (2003) lässt sich ein VR-System ganz allgemein in ein Hard- und ein Softwaresystem gliedern, das aus Sensoren, Effektoren und der Koppelung dieser beiden Komponenten besteht.

#### Darstellungsmedien

Eine sehr wichtige Komponente von VR-Systemen ist das verwendete Display, das auch als Darstellungsmedium bezeichnet werden kann, da unter diesem Begriff die Darstellung aller zur Verfügung stehender Inhalte zusammengefasst werden können: z.B. grafische Displays für die Visualisierung, akustische oder haptische Displays und weitere (siehe auch Kapitel 2.1). Die Simulation visueller und haptischer Inhalte spielen für die Anwendung im virtuellen Fahrerplatzmodell, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln aufgezeigt, die wichtigste Rolle und sollen deshalb aus technischer Sicht weitergehend erläutert werden

**Grafikdisplays** dienen der Visualisierung der Simulationen in einem VR-System, dazu werden dem Nutzer berechnete Ansichten auf dem Grafikdisplay eingeblendet. Sie spielen nach dem heutigen Stand der Technik die wichtigste Rolle in VR-Simulationen. Wichtige Differentierungsmerkmale heute eingesetzter Grafikdisplays sind u.a. die eigentliche Projektionstechnik, der Abschottungsgrad von der realen Umwelt (vgl. Ka-

pitel 2.2), das realisierte Sichtfeld (Field-of-View, FoV), die Auflösung, das benötigte Arbeitsvolumen, die Möglichkeit mehrere Nutzer einzubinden und die Okularität<sup>14</sup>.

Kopfbasierte Grafikdisplays werden als **Head-Mounted Displays (HMD)** oder Datenbrillen bezeichnet. Die Displayeinheit wird hierbei über eine helm- oder brillenartige am Kopf des Nutzers befestigte Halterung direkt vor dem Auge des Nutzers fixiert (vgl. Abbildung 2.13). Es existieren Ausprägungen, die nur einem Auge oder auch beiden Augen die Informationen zur Verfügung stellen. Die Displayeinheit kann nach Schrader (2003) entweder voll-immersiv, d.h. gänzlich von der realen Umwelt abgeschirmt, oder halbtransparent ausgeführt sein. Im Gegensatz zu monokularen HMD sind binokulare HMDs in der Lage, eine virtuelle Umgebung stereoskopisch darzustellen, dazu werden in diesen Geräten zwei separate Bildquellen eingesetzt. Hier müssen der individuelle Augabstand und die Überlappung der beiden Bilder als Parameter der zugrundeliegenden Berechnung der beiden Perspektiven der virtuellen Szene berücksichtigt werden. Im Folgenden wird die weitere Betrachtung von HMDs auf binokulare, voll-immersive Geräte beschränkt, da diese überwiegend in zum virtuellen Fahrerplatzmodell vergleichbaren Anwendungen Einsatz finden (siehe auch Voß, 2008). Ausführliche Darstellungen zu monokularen oder semitransparenten Displays finden sich u.a. bei Reif (2009).

Ein wichtiges Differenzierungskriterium verschiedener HMD ist das darstellbare Field-of-View, darunter versteht man die maximale Größe des angezeigbaren Bildes. Das FoV wird meist in Form eines horizontalen und vertikalen Winkelbetrags angegeben<sup>15</sup>. Heute verfügbare HMD erreichen das Blickfeld des Menschen zu weniger als 50% (siehe Abbildung 2.12 oder auch Ziegler u. Kücherer (2003)). Die Darstellung des stereoskopischen Effekts ist nur dann korrekt, wenn der Sehstrahl senkrecht auf die Displays trifft. Ist dies nicht der Fall, können Doppelbilder entstehen. Dies ist vor allem in den Randbereichen der Displays der Fall, wenn der Nutzer des HMD ein Objekt am Rand des Bildes erfassen will und zur Seite blickt.

Ein kleines FoV bedingt, dass der Nutzer bei der Informationssuche zu einem größeren Anteil auf seine Kopfbewegung und weniger auf die Augenbewegung zurückgreifen muss, d. h. es kann mehr Zeit für die Informationssuche nötig sein, was wiederum zu Diskomfort und Desorientierung führen kann (Melzer u. Moffitt, 1996). Neben dem FoV spielt die Auflösung des Displays eine wichtige Rolle. Um diesen Wert vergleichbar anzugeben, wird in der Fachliteratur (u.a. Reif, 2009) folgende Formel vorgeschlagen, welche die reine Pixelauflösung des Displays ins Verhältnis zum FoV setzt und sich in eine horizontale und eine vertikale Auflösung aufgliedert:

$$\text{Auflösung} [^\circ/\text{Pixel}] = \frac{\text{FoV} [^\circ]}{\text{AnzahlBildpunkte}[\text{Pixel}]}$$

Mit der idealisierten menschlichen Sehschärfe von ca. einer Winkelminute (entspricht 0,01666°) lässt sich daraus die optimale Konfiguration für ein HMD bezüglich Auflösung

<sup>14</sup>Die Okularität beschreibt, ob ein Grafikdisplay nur monokulare, biokulare oder auch binokulare Inhalte darstellen kann. Unter einer biokularen Darstellung versteht man, dass beide Augen ein eigenes Display haben und auf beiden das gleiche Bild dargestellt wird.

<sup>15</sup>Häufig wird auch der sich aus vertikalem und horizontalem Winkel ergebende diagonale Winkel als FoV angegeben.

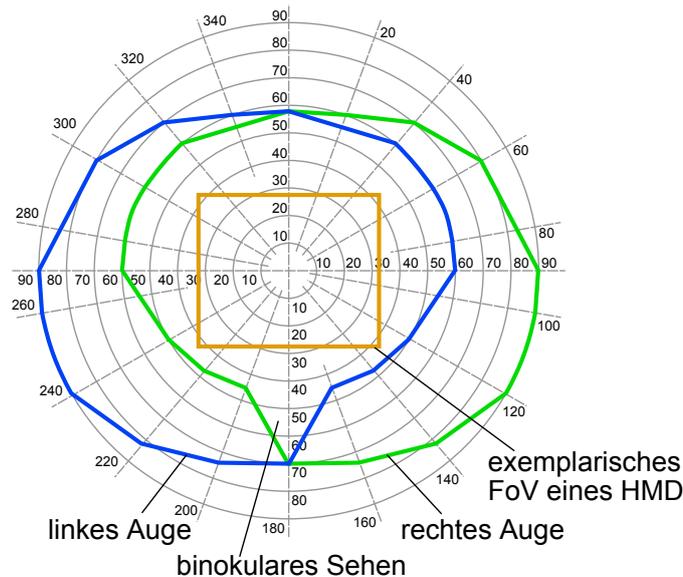


Abb. 2.12: Sichtbereich des Menschen nach DIN 15996 (2006) und exemplarisches FoV eines HMD vom Typ Rockwell Collins ProView SR80-A (Rockwell-Collins, Inc., 2010)

und FoV ableiten. Neben der Bildwiederholffrequenz, also der Rate mit der das Darstellungsmedium in der Lage ist ein neues Bild anzuzeigen, ist auch die Bildqualität, also die Schärfe und der Kontrast des Displays, ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung eines HMDs. Heutige HMDs mit LCD<sup>16</sup> oder OLED<sup>17</sup> Displaytechnologie sind in der Lage eine Bildwiederholffrequenz von 60Hz darzustellen. OLED-Displays bieten gegenüber LCD-Displays folgende Vorteile, welche die Qualität des Bildes positiv beeinflussen: kein Flackern des Bildes und keine Schliereffekte bei bewegten Bildern.

Typische Werte für die Chromatik, d.h. die darstellbare Farbtiefe von HMDs sind 4 bis 32 Bit, d. h. 16 bis 16 Millionen Farben. Bei semitransparenten HMDs muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass der Spiegel dunkler und der Transmissionsgrad kleiner wird, um die Farbdarstellung realisieren zu können.

Nach (Reif, 2009) ist für die Nutzerakzeptanz von HMDs neben den genannten visuellen Aspekten auch der ergonomische Tragekomfort von hoher Bedeutung. Zusätzlich zum Gewicht des HMD ist hier auch die Schwerpunktlage ein entscheidender Faktor. Das vom Nutzer aufzubringende Haltemoment in der Nackenmuskulatur muss so gering wie möglich gehalten werden, damit das Tragen des HMD nicht als störend oder hinderlich empfunden wird (Oehme, 2004). Hierzu ist es zielführend, wenn der Schwerpunkt des HMD möglichst nah am Kopffzentrum liegt und das Gewicht selbst so gering wie

<sup>16</sup>Bei dieser Technologie wird durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an Flüssigkristallsegmente deren Helligkeit und die Durchlässigkeit für polarisiertes Licht (Hintergrundbeleuchtung) gesteuert.

<sup>17</sup>Organische Leuchtdioden emittieren Licht im Gegensatz zu LCD Displays, die eher als Farbfilter wirken. Sie bestehen aus einem oder mehreren organischen Filmen zwischen zwei Elektroden.

möglich gehalten wird. Beeinträchtigungen wie Druckstellen sind zu vermeiden (Oehme, 2004). Die Position des HMD muss möglichst einfach auf den Nutzer anpassbar sein. Das HMD darf während der Nutzung nicht verrutschen, z.B. durch Bewegungen der Gesichtsmuskulatur oder andere Störeinflüsse. Je mehr Einstellmöglichkeiten, desto besser ist das HMD an den Benutzer anpassbar, aber desto länger dauert nach Rottenkolber u. a. (2004) auch der Einstellvorgang. Konzepte mit kabelloser Bildübertragung (z.B. per Funknetzwerk) verbessern die Bewegungsfreiheit des HMD-Nutzers. Weitere ergonomische Anforderungen an HMDs sind ausführlich bei Voß (2008) aufgeführt.

Ein weiteres Problem kann darin bestehen, dass für jeden Nutzer, der die VR-Szene immersiv erleben soll ein eigenes HMD benötigt wird (Salzmann u. a., 2009), um jeweils separate berechnete Perspektiven darstellen zu können. Abbildung 2.3 zeigt die technischen Kennwerte heute gebräuchlicher HMDs.

<i>HMD</i>	<i>FoV (H x V)</i>	<i>Auflösung</i>	<i>Technologie</i>	<i>Gewicht</i>
NVIS ST50	40° x 32°	1,9 (H & V)	OLED	1kg
NVIS ST	48° x 40°	2,3 (H & V)	LCD	1,3kg
NVIS MX120	114° x 64°	5,3 (H) & 3,6 (V)	LCD	1,4kg
Rockwell Collins SR80	63° x 53°	2,9 (H) & 3,1 (V)	LCD	0,8kg
Sensics piSight <sup>18</sup>	bis 179° x 60°	2,9 (H & V)	OLED	1kg

Auflösung in [Winkelminuten/Pixel]; H: horizontal; V: vertikal

Tab. 2.3: Übersicht der technischen Daten gebräuchlicher HMD

Neben HMDs stellen **CAVE<sup>TM</sup> und Projektionsleinwände** die zweite große Gruppe der Darstellungsmedien dar. Im Gegensatz zu im Heimkinobereich verbreiteten Projektionssystemen bieten die bei VR-Simulationen eingesetzten Systeme die Möglichkeit der stereoskopischen Darstellung auf einer oder auch mehreren Projektionsflächen. Hierzu müssen die für das linke und rechte Auge unterschiedlichen Bilder dem Nutzer auf der Projektionsfläche dargestellt werden. Als technische Lösung für dieses Problem haben sich zweierlei Lösungen etabliert. Erstens ein Verfahren, das in einem schnellen Wechsel (z.B. mit 50Hz) die Bilder für linkes und rechtes Auge auf der Projektionsfläche darstellt. Um den stereoskopischen Effekt zu erzeugen benötigt der Nutzer zusätzlich eine sogenannte Shutterbrille, die in schnellem Wechsel nur die passende Seite der Brille öffnet. Dies erfolgt synchronisiert zur Anzeige und erfolgt bei genügend schnellem Wechsel unbemerkt vom Nutzer. Das zweite etablierte Verfahren beruht auf Polarisierungseffekten. Hierzu werden vor den Objektiven der Projektoren unterschiedliche Polarisationsfilter angebracht. Diese stellen das Bild gleichzeitig auf einer speziell beschichteten Leinwand dar. Die Dekodierung der stereoskopischen Information findet beim Anwender durch Polarisationsbrillen statt, die beiden Augen jeweils die passende Information zur Verfügung stellen. Gegenüber der Lösung mit Shutterbrillen wird beim Polarisationsfiltermecha-

<sup>18</sup>Beim Sensics piSight werden mehrere Displays in einer Art Matrixanordnung pro Auge gruppiert, allerdings entstehen Bildartefakte an den Displaygrenzen. Es entsteht ein sehr störender Gittereffekt.

nismus die doppelte Anzahl an Projektoren benötigt. Mit mehreren Projektoren und einer größeren Projektionsleinwand lässt sich die Darstellung auch weiter skalieren um ein größeres FoV abzudecken, ohne Auswirkung auf die Auflösung. Die Systeme lassen sich hinsichtlich der Leinwand- bzw. Projektionsflächenanordnung unterscheiden: weit verbreitete Systeme sind CAVE<sup>TM</sup> (würfelförmige Anordnung vgl. Abbildung 2.13) oder Powerwalls (großflächige Leinwände u.U. mit gekrümmter Projektionsfläche). Die Projektion kann entweder auf die Vorderseite der Leinwand (Aufprojektion) oder auf die Rückseite (Rückprojektion) erfolgen. CAVE<sup>TM</sup> sind üblicherweise systembedingt semi-immersiv, besonders bei der Anwendung im Falle virtueller Sitzkisten befinden sich häufig reale Bauteile (z.B. das Lenkrad) zwischen Nutzer und Projektionsfläche. Zweiter Aspekt, der eine voll-immersive Darstellung schwierig macht ist die Anforderung den Nutzer komplett mit der virtuellen Umgebung zu umschließen. Dies erfordert eine Leinwandanordnung in Form eines geschlossenen Würfels. Derartige Systeme sind sehr kostenintensiv und deshalb wenig verbreitet (Schrader, 2003). Gegenüber HMD-Anwendungen bietet sich zusätzlich der Vorteil, dass auch größere Gruppen gleichzeitig die virtuelle Umgebung erleben können, es werden nur zusätzliche spezielle Brillen benötigt, wie oben beschrieben. Allerdings wird bei der Visualisierung für mehrere Benutzer im Regelfall nur die korrekte Perspektive für einen einzigen Hauptanwender dargestellt<sup>19</sup>. Für die übrigen Anwender ist die dargestellte Szene dann umso stärker verzerrt bzw. verfälscht abgebildet, je weiter sie von diesem Hauptanwender entfernt sind. Es entstehen hier insbesondere Probleme, wenn sich der Hauptnutzer bewegt und sich die Visualisierung für die anderen Anwender unrealistisch verzerrt.



Abb. 2.13: Aufbau einer CAVE<sup>TM</sup> nach Araki u. a. (2007) (links), Head-Mounted Display ProView SR80-A von Rockwell Collins (rechts)

Weiterhin sind auch autostereoskopische Monitore bekannt. Bei derartigen Systemen benötigen der oder die Betrachter keine zusätzliche Hilfsmittel wie Shutterbrillen oder ähnliches zur Wahrnehmung der stereoskopisch dargestellten Inhalte. Die beiden Perspektiven für linkes und rechtes Auge werden gleichzeitig projiziert, allerdings werden

<sup>19</sup>Eine Ausnahme stellen so genannte Multi-View-Displays dar, bei denen gleichzeitig für mehrere Anwender die jeweils passende Perspektivdarstellung auch in stereo berechnet und dargestellt wird. Diese häufig auf Sichtsektoren basierende Technologie weist bisher aber den Nachteil auf, dass bei einer freien Bewegung der Anwender die Perspektivdarstellung nicht homogen an die Bewegung angepasst wird, sondern deutlich erkennbare Übergänge aufweist.

die beiden Bilder durch ein Linsenraster oder Streifenmasken vor dem Display für beide Augen getrennt dargestellt. Um einen korrekten Stereoeindruck zu bekommen ist die Bewegungsfreiheit des Anwenders sehr eingeschränkt. Es existieren auch Lösungen, die mit mehreren Teilbildern arbeiten, dadurch wird die Bewegungsfreiheit erhöht, allerdings wird gleichzeitig die Bildqualität verschlechtert. Bei den Lösungen mit mehreren Teilbildern ist auch die gleichzeitige Darstellung für mehrere Anwender möglich. Derartige Displays sind im industriellen Umfeld heute nur sehr vereinzelt im Einsatz.

Um virtuelle Umgebungen spüren und berühren zu können sind **haptische Displays** notwendig. Die Simulation haptischer Inhalte setzt natürlich immer die Berührung oder das Anfassen des entsprechenden Darstellungsmediums voraus, diese physikalische Interaktion entspricht somit auch einer Kategorisierung als Interaktionsmedium. Durch die Ausführungen in Kapitel 2.3.1 wird deutlich, wie breit das Spektrum der über den haptischen Kanal übertragenen Informationen ist. Betrachtet man zusätzlich noch die Verteilung der entsprechenden Wahrnehmungsorgane beim Menschen, also den ganzen Körper, wird klar wie komplex eine umfassende virtuelle Simulation im Sinne eines haptischen Displays idealerweise aufgebaut sein sollte. Heutige Systeme haben nach Schrader (2003) ihren Ursprung meist in der Robotik und Teleoperation. Heute verfügbare Systeme unterscheiden sich teilweise sehr stark, da jeweils verschiedene Teilaspekte des haptischen Sinneswahrnehmung angesprochen werden: Beispielsweise gibt es rein taktile Displays, die es ermöglichen, verschiedene Oberflächen zu erfühlen oder Displays, die primär die thermische Wahrnehmung ansprechen. Auf der anderen Seite existieren Krafterückkopplungssysteme, die auch aktiv mit den betreffenden Körperteilen wechselwirken. Diese Krafterückkopplungssystemen sind teilweise stationär, hier wird die Form der Objekte häufig mittels spezieller Hilfsobjekte (z.B. gekoppelter Stift oder Fingerhüte) übertragen, es gibt aber auch mobile Ansätze, die beispielsweise mittels Exoskeletten auf verschiedene Gliedmaßen wirken. Auswahlkriterium bei diesen Mechanismen ist vor allem die Einschränkung des Bewegungsraum des Nutzers und der Bauraum die derartige Simulationen benötigen. Eine weiterführende Auswahl entsprechender Konzepte findet sich bei z.B. bei Youngblut u. a. (1996); Zwisler (1998); Srinivasan u. Basdogan (1997) oder Scharm u. Breining (1999).

Als wesentliche Nachteile sind folgende Aspekte zu nennen: Die komplexen Zusammenhänge lassen sich nicht realitätsgetreu darstellen (Schrader, 2003). Dies beinhaltet sowohl die Darstellung komplexer Formen, als auch die Darstellung stabiler Zustände<sup>20</sup> Grenzen ergeben sich in der mechanischen Darstellbarkeit und der Integration der benötigten Komponenten im Bewegungsraum des Anwenders. Es werden meist nur einzelne Aspekte der haptischen Wahrnehmung simuliert, gesamtheitliche Ansätze sind nicht verfügbar (vgl. auch Abbildung 2.14).

#### Positionierungssysteme

Die zweite wichtige Komponente eines VR-Systems sind die eingesetzten Positionierungs- und Orientierungssysteme, sie dienen der Ortsbestimmung der Benutzer sowie beliebiger

<sup>20</sup>Tsai (1996) berichtet hier von Instabilitäten, die auf einer mechanischen Unruhe des Systems beruhen, obwohl eigentlich stabile Objekte simuliert werden sollen.



Abb. 2.14: Verschiedene haptische Displays. Von links nach rechts: taktiler Feedback an den Fingerkuppen mittels Druck und Vibration (nach Zürl u. Weiß, 2008a), Exoskelett zur Kraftrückkopplung für die Finger (nach Yazadi, 2010), Kraftrückkopplungssystem mit Handgriff (nach Haption, 2010), Exoskelett zur Kraftrückkopplung für Schulter, Ellbogen und Handgelenk (nach Roosen, 2010)

Objekte und ermöglichen somit u.a. die Interaktion als eine der fundamentalen Voraussetzungen der Virtuellen Realität. Ein echtzeitfähiges, genaues Tracking trägt dabei entscheidend zum Immersivitätseindruck bei (Slater u. Steed, 2000).

Positionierungssysteme bestimmen die sechs Freiheitsgrade eines Objekts im Raum. Durch die drei translatorischen und drei rotatorischen Koordinaten sind Position und Ausrichtung eindeutig bestimmt. Die Berechnung dieser Koordinaten erfolgt in Echtzeit und muss möglichst ohne Verzögerung an das VR-System weitergegeben werden. Für die Erzeugung der stereoskopischen Perspektive des Anwenders sind die Positionierungssysteme von grundlegender Bedeutung. Nur bei einer exakten Bestimmung der Position und Ausrichtung des Sichtstrahls des Anwenders ist eine Berechnung der Visualisierung im VR-System überhaupt möglich. Position und Orientierung eines Objekts beziehen sich dabei immer auf ein Bezugs- oder Weltkoordinatensystem. Dazu besitzt das System Sensoren, die in der Lage sind, die Freiheitsgrade bestimmter Signalgeber zu bestimmen. Die Anordnung von Sensoren und Signalgebern unterscheidet dabei drei verbreitete Systemkonfigurationen: Beim sogenannten *outside-in Tracking*<sup>21</sup> befinden sich die Sensoren an bekannten festen Positionen im Bezug auf das Weltkoordinatensystem, während sich die Signalgeber im Raum frei bewegen. Das sogenannte *inside-out Tracking* bezeichnet eine Anordnung, bei der die Signalgeber an bekannten festen Positionen im Bezug auf das Weltkoordinatensystem angeordnet sind und die Sensoren sich bewegen. Als dritte Variante ist die sogenannte *inside-in* Anordnung bekannt, hierbei bewegen sich sowohl Sensor als auch Signalgeber.

Neben den aufgeführten Aspekten Echtzeitfähigkeit und Systemkonfiguration werden in der Literatur (u.a. bei Schrader, 2003; Reif, 2009) zur Kategorisierung von Positionierungssystemen die weiteren Gesichtspunkte Genauigkeit, Robustheit und Skalierbarkeit genannt. Die Genauigkeit bezeichnet dabei die Auflösung der Positionierungsdaten. Die Anwendung im virtuellen Fahrerplatzmodell stellt dabei hohe Anforderungen an die

<sup>21</sup>Unter dem Begriff Tracking wird in diesem Zusammenhang die Berechnung der Freiheitsgrade bzw. Koordinaten eines oder mehrerer Objekte im Raum verstanden.

Überlagerung der visuellen und haptischen Simulation (vgl. hierzu auch Voß, 2008) sowie an die korrekte Visualisierung. Reif (2009) nennt hierzu typische translatorische Abweichungen eingesetzter Systeme von  $\pm 1$  mm. Ein besonderes Augenmerk gilt in diesem Zusammenhang möglichen Winkelfehlern, da sich hier Fehler direkt proportional zum Abstand von Sensor und Signalgeber verhalten. Kurzzeitige Verdeckungen von Signalgebern und Sensoren sowie sich ändernde Umgebungseinflüsse sollten vom Messsystem kompensiert werden. Dies stellt einen Aspekt der Robustheit des Positionierungssystems dar. Desweiteren müssen die Messergebnisse eine hohe Wiederholgenauigkeit aufweisen, ein störendes Zittern der Koordinatenwerte sollte ebenfalls vermieden werden. Die Skalierbarkeit des Positionierungssystems beschreibt einerseits die Möglichkeit, auch die Koordinaten mehrere Signalgeber gleichzeitig ohne Einbußen bei Genauigkeit und Echtzeitfähigkeit zu erfassen. Andererseits muss auch das Trackingvolumen, also der Bereich, in dem die Sensoren die Position und Orientierung der Signalgeber bestimmen können, an den spezifischen Anwendungsfall adaptierbar sein.

Nach dem zugrundeliegenden physikalischen Messprinzip lassen sich bei heute eingesetzten Positionierungssystemen folgende Varianten unterscheiden:

**Mechanische Trackingsysteme** stellen die am frühesten verwendete Technologie zur Bestimmung von Lage und Orientierung in VR-Simulationen dar. Das bewegliche Objekt ist dabei mit einem mechanischem System aus Auslegern und Gelenken fest verbunden (Sutherland, 1965). Die Ausrichtung der Gelenke wird mittels Winkelgebern gemessen und daraus die Position der Ausleger errechnet. Dabei sind nach Reif (2009) sehr hohe translatorische als auch rotatorische Messgenauigkeiten gegeben. Einer hohen Robustheit und geringer Latenz stehen allerdings auch deutliche Nachteile gegenüber. Die feste Verbindung zum beweglichen Objekt schränkt die Bewegungsfreiheit des Anwenders bzw. das nutzbare Arbeitsvolumen deutlich ein. Desweiteren ist das gleichzeitige Vermessen mehrerer Objekte nur eingeschränkt möglich. Eine klassische Anwendung stellt z.B. die Erfassung von HMD-Bewegungen dar, hierbei kann bei entsprechender Umsetzung das Eigengewicht des Displays kompensiert werden (vgl. Abbildung 2.15). Einige mechanische Trackingsysteme bieten zusätzlich die Möglichkeit als haptisches Display eingesetzt zu werden (vgl. Abbildung 2.14). Verwandte Systeme werden in den Bereichen Robotik und Medizin, aber auch als Koordinatenmessmaschine in der Fahrzeugentwicklung eingesetzt.

Bei **akustischen Trackingsystemen** wird von den Signalgebern ein akustisches Signal im Ultraschallbereich emittiert, das von den Sensoren in diesem Fall Mikrofonen empfangen wird. Ultraschall eignet sich nach Reif (2009) für den Einsatz in Gebäuden und Laborumgebungen, die Signale sind für den Menschen nicht hörbar. Position und Orientierung im Raum werden über Laufzeitmessung oder Phasenverschiebung des Signals ermittelt. Neben Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit beeinflussen auch Signalechos die Genauigkeit des Systems.

**Funksysteme zur Positionierungsbestimmung** finden heute im Bereich der Warenlogistik eine große Verbreitung. Gemeinsam ist den bekannten Systemen wie etwa dem satellitengestützten GPS, WLAN zur drahtlosen Datenübertragung in einem Computernetzwerk, RFID-Systemen zur kontaktlosen Identifikation mittels Funkübertragung und Ultra-Wideband-Funksystemen aber der Nachteil einer Genauigkeit der Positionie-



Abb. 2.15: Mechanische Positionierungssysteme. Links und Mitte: Binocular Omni-Orientation Monitor der Fa. Fakespace. Rechts: Virtual Car Display Aufbau von Art+Com (Vuylsteker, 2004; Waterworth, 1999)

rungsdaten größer  $\pm 15\text{cm}$ . Eine umfassende Übersicht derartiger Systeme und ihrer Funktionsweise ist bei Reif (2009) zu finden.

**Elektromagnetische Trackingsysteme** stellen eine etablierte Technologie zur Positionierungsberechnung im Bereich von VR-Simulationen dar. Die Messmethode basiert auf der Kombination von jeweils drei zueinander orthogonal angeordneter Spulen in Signalgeber und Sensor. Mit den einzelnen Spulen des Sensors wird dabei jeweils nacheinander ein elektromagnetisches Feld erzeugt. Dieses induziert Ströme in den Spulen des Signalgebers, deren Stärke einen direkten Rückschluss auf Position und Orientierung zulässt. Nachteilig erweisen sich dabei einerseits die Störung anderer Geräte durch das erzeugte Magnetfeld, andererseits beeinflussen auch andere ferromagnetische Objekte im Messvolumen die Genauigkeit der Positionierungsbestimmung sehr stark.

Bei **inertialen Trackingsystemen** verschmelzen im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Systemen Signalgeber und Sensor zu einer Einheit, die sich auf dem beweglichen Objekt befindet. Die translatorischen und rotatorischen Impulse des Objekts dienen dabei als Messsignale. Es wird die translatorische und rotatorische Beschleunigung des Objekts gemessen und daraus die Position und Lage durch Integration der Messwerte ermittelt. Dieses indirekte Verfahren zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade des bewegten Objekts kann zu einer bestimmten Ungenauigkeit in der Positionierung führen, beispielsweise entsteht in den rotatorischen Beschleunigungssensoren, sogenannten Gyroskopen, Winkelabweichungen bezüglich den Rotationsachsen durch Reibung in den Lagern. Die Wiederholgenauigkeit der Positionierungsbestimmung nimmt daher mit der Zeit ab, das Messsystem ist in diesem Fall erneut zu kalibrieren. Inertiale Trackingsysteme bieten den Vorteil, dass Verdeckungen systembedingt nicht auftreten können, Sensor und Signalgeber sind eine Einheit.

**Optische Trackingverfahren** basieren auf der Erfassung künstlicher Referenzen, auch als Marker oder Targets bezeichnet, oder natürlicher Merkmale, z.B. Kanten und ebene Formen, mittels einer oder mehrerer Kameras. In VR-Systemen werden häufig Infrarotkameras (Sensoren) in Verbindung mit aktiven oder passiven Markern (Signalgebern) eingesetzt. Während hierbei aktive Marker Signale in Form von Infrarotsignalen

aussenden, reflektieren passive Marker die von den Kameras ausgesendeten Infrarotblitze. Die Bestimmung von Position und Orientierung basiert auf der Aufnahme eines Markers aus mindestens zwei Kameraperspektiven. Mittels Triangulation können bei bekannter Positionierung der Kameras die sechs Freiheitsgrade des Markers bestimmt werden (vgl. Abbildung 2.16, links). Es existieren hier auch passende Marker zur Detektion der Bewegungen des Anwenders in der VR-Umgebung, ein entsprechender Satz an Markern für diesen auch als Motion Capturing bezeichneten Einsatz von Trackingssystemen ist in Abbildung 2.16 (Mitte) dargestellt. Für videobasierte Trackingsysteme existieren entsprechende Marker (vgl. Abbildung 2.16, rechts). Über Algorithmen aus der automatischen Bild- bzw. Mustererkennung wird aus der Verzerrung der Marker im aufgenommenen Videobild deren Position bestimmt. Die verwendeten Marker müssen dem System vorher bekannt sein, damit diese erkannt werden können. Es existieren weiterhin Ansätze, die unter Verwendung einer stereoskopischen Analyse von Bilddaten Objektoberflächen im dreidimensionalen Raum rekonstruieren. Diese auch als modellbasiertes Trackingverfahren bezeichneten Herangehensweisen werden nach Schrader (2003) beispielsweise zur berührungslosen Vermessung von Personen eingesetzt. Auch aus dem Bereich aktueller Spielkonsolen aus dem Consumerbereich sind ähnliche Trackingverfahren bekannt (Forbes u. Dayal, 2010). Bei Bowden u. a. (1996) wird ein Verfahren zur Detektion von Hand- und Kopfmodellen beschrieben. Weitere Ansätze aus der Forschung sind u.a bei Schlegel (2010) und Engstler u. a. (2008) zu finden. Im industriellen Einsatz von VR-Simulationen sind diese Verfahren allerdings noch wenig verbreitet (Schrader, 2003). Ein ähnlicher modellbasierter Ansatz, der auf der Erkennung von Kanten und Flächenmodellen basiert, wird bei Reif (2009) beschrieben. Neben einer möglichst klar strukturierten, kontrast- und kantenreichen Umgebung wird auch hier eine Kalibrierung des Systems über Referenzaufnahmen benötigt.



Abb. 2.16: Optische Positionierungssysteme. Links: Funktionsweise eines Infrarot-trackingssystems mit passiven Markern. Mitte: Passive Infrarottargets für Motion Capturing (beide Zürl u. Weiß, 2008b). Rechts: Marker für ein videobasiertes Trackingverfahren

Kommerzielle optische Trackingsysteme (markerbasiert) zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit und Echtzeitfähigkeit aus, die gleichzeitige Erfassung mehrerer Targets ist gut möglich. Größtes Problem in der Anwendung sind Verdeckungen. Werden die Marker von den Kameras nicht gesehen, stehen keine Positionierungsdaten zur Verfügung.

**Hybride Trackingverfahren** stellen im Sinne der physikalischen Kategorisierung nach Messprinzipien keine eigene Klasse von Positionierungssystemen dar. Unter diesen Verfahren ist vielmehr eine Kombination verschiedener Trackingverfahren zu verstehen. Diese Kombination kann komplementär erfolgen, d.h. die einzelnen Messsysteme hängen nicht voneinander ab. Von einer konkurrierenden Kombination spricht man, wenn die unterschiedlichen Sensorsysteme redundante Positionierungsdaten liefern. Dadurch kann eine Reduktion von Messfehlern realisiert werden. Reif (2009) beschreibt ebenfalls die kooperative Kombination, hier werden die Positionierungssysteme mehrstufig kombiniert: Beispielsweise wird mittels einem ersten (z.B. beweglichen) Positionierungssystem die relative Position eines Objekts ermittelt, ein zweites ortsfestes Positionierungssystem ermittelt gleichzeitig die Position des ersten Messsystems. Somit ist die absolute Position und Orientierung des Objekts eindeutig in ihrem Bezug auf das Weltkoordinatensystem ermittelt. Derartige Kombinationen erlauben es u.U. Schwachpunkte einzelner Trackingverfahren auszugleichen, eine höhere Genauigkeit zu erzielen oder das Messvolumen deutlich zu vergrößern. Das Problem bei der Kombination der Trackinginformationen besteht häufig in der idealen Gewichtung der sich eventuell auch widersprechenden Daten, um daraus die korrekten und eindeutigen Koordinatenwerte zu ermitteln. In der Literatur wird beispielsweise die Kombination eines optischen Positionierungssystems mit einem elektromagnetischen (You u. a., 1999) bzw. einem inertialen (Auer, 2000) Trackingsystem beschrieben. Die Robustheit des Gesamtsystems gegenüber Verdeckungen beim optischen Tracking wird deutlich gesteigert. Sobald ein optischer Marker nicht mehr erkannt wird, kann auf die Daten des zweiten Trackingsystems zurückgegriffen werden. Wenn keine Verdeckung mehr besteht, werden die Marker des zweiten Trackingsystems wieder rekaliert, damit wird der Nachteil der eingeschränkten Wiederholgenauigkeit dieser Systeme ebenfalls optimiert. Darüber hinaus sind natürlich auch beliebige andere Kombinationen verschiedener Trackingsysteme denkbar.

### Manipulationssysteme

Zum Zweck der Interaktion mit der virtuellen Umgebung existieren Manipulationssysteme: weit verbreitet sind Zeigegeräte, 3D-Joysticks oder Flysticks. Aber auch bekannte PC-Eingabegeräte wie Tastatur oder Trackball werden teilweise verwendet. Mit speziellen Datenhandschuhen können die Fingerbewegung erkannt werden. Übliche Verfahren basieren auf mechanischen, elektrischen, optischen oder fiberoptischen Wirkprinzipien. Eine Beispielanwendung ist in Abbildung 2.14 gezeigt: Der mit einem Exoskelett erweiterte Datenhandschuh ermittelt die Fingerstellung mittels Dehnmessstreifen an den Gelenken von Finger und Hand. Derartige Systeme sind sowohl der Gruppe der Trackingsysteme zuzuordnen, da durch sie etwa die Steuerung eines digitalen Handmodells ermöglicht wird. Andererseits können sie auch als Manipulationssystem kategorisiert werden, z.B. als Interaktionsmedium im Sinne einer Gestensteuerung.

Weiterhin besteht auch die Möglichkeit eine Sprachsteuerung als Eingabemedium für die virtuelle Umgebung einzusetzen. Bei Probst (2010) wird hierzu ein geeignetes Interaktionskonzept vorgestellt.

### Berechnung und Visualisierung

Die eigentlichen Berechnungssysteme stellen eine weitere Hardwarekomponente von VR-Systemen dar. Die Rechner- und Computerhardware trägt wesentlich zur Systemperformance bei.

Das Softwaresystem gliedert sich nach Schrader (2003) in Komponenten zur geometrischen und funktionalen Modellierung, zur Kontrolle der Simulation, zur Koordinierung der Kommunikation und in Komponenten zum eigentlichen Rendering. Die geometrische Modellierung legt die Oberflächen-, Farb- oder Texturinformationen für ein Objekt fest, wohingegen die funktionale Modellierung die Freiheitsgrade von Objekten und das entsprechende Verhalten festlegt. Die Kontrolle der Simulation führt die Interaktionen des Nutzers und die Verhaltensparameter von Objekten in einer ständigen Berechnung aller Simulationseinhalte zusammen. Beim Rendering werden die Daten der Simulation in konkrete Ausgaben überführt, beispielsweise diskrete Bilder. Entsprechende Techniken und Mechanismen werden z.B. bei Riedel (1997) oder Fellner (1992) beschrieben.

Die einzelnen Komponenten und Subsysteme müssen schließlich über eine entsprechende Vernetzung miteinander verbunden werden. An dieser Stelle sei nochmals auf die Arbeit von Schrader (2003) verwiesen, der sich intensiv mit dem informationstechnischen Aufbau der beschriebenen Systeme befasst.

### 2.3.3 Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells

Nachdem in den vorangehenden Abschnitten eingehend der Einsatzbereich der aufzubauenden VR-Simulation beschrieben und ein Überblick zu verschiedenen grundlegenden Technologien erläutert wurde, soll im Folgenden der Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells anhand der verwendeten Komponenten abgeleitet werden. Als wesentliche Randbedingung ist neben dem Einsatzgebiet in der ergonomischen Auslegung und Analyse eines Fahrzeuginterieurs (vgl. Kapitel 2.2) an dieser Stelle die menschliche Wahrnehmung (vgl. Kapitel 2.3.1) zu nennen. Beide Aspekte müssen als grundlegende Bestandteile des Mixed-Reality-Aufbaus Beachtung finden, da durch sie einerseits festgelegt ist, was die Simulation beinhaltet („Was muss simuliert werden?“) und welche Stimuli berücksichtigt werden müssen („Wie muss simuliert werden?“).

Die wesentlichen Komponenten des virtuellen Fahrerplatzmodells, das als Untersuchungsmedium für die vorliegende Arbeit aufgebaut wurde, sollen im Folgenden beschrieben werden. Die einzelnen in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Komponenten haben dabei einen großen Einfluss aufeinander, sodass es vor allem auf die Auswahl eines geeigneten Gesamtsystems ankommt. Der zentrale Aspekt hierbei ist die Auswahl der eingesetzten visuellen und haptischen Displays.

Bei einer Recherche verwandter Systeme (z.B. bei Voß, 2008; Hofmann, 2002; Schrader, 2003) bzw. der Gegenüberstellung des Systemaufbaus und wesentlicher Kennwerte (vgl. Kapitel 2.3.2) zeigen sich sehr schnell die systembedingten Vorteile der visuellen Darstellung über ein Head-Mounted Display. Zwar besteht hier zweifelsohne Weiterentwicklungspotential in der eingesetzten Displaytechnologie im Bezug auf Field-of-View oder dargestellte Auflösung. Allerdings ist nur mit dieser Technologie das vollständige

## 2 Theoretischer Hintergrund

Eintauchen in die virtuelle Umgebung möglich. Vor dem Hintergrund des Einsatzszenarios, also der ergonomischen Bewertung des Innenraums, ist es essentiell, dass der Anwender sich nicht mehr seiner virtuellen Umgebung bewusst ist, sondern sich nur noch auf die dargestellten und zu bewertenden Inhalte konzentriert. Jegliche Ansätze, die dem Anwender Unterschiede zwischen realer und virtueller Umgebung bewusst machen, wie dies bei vielen Technologien aus dem Bereich Augmented Reality der Fall ist, sind daher eher ungeeignet.

Abbildung 2.17 zeigt das Gesamtsystem und den Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells.

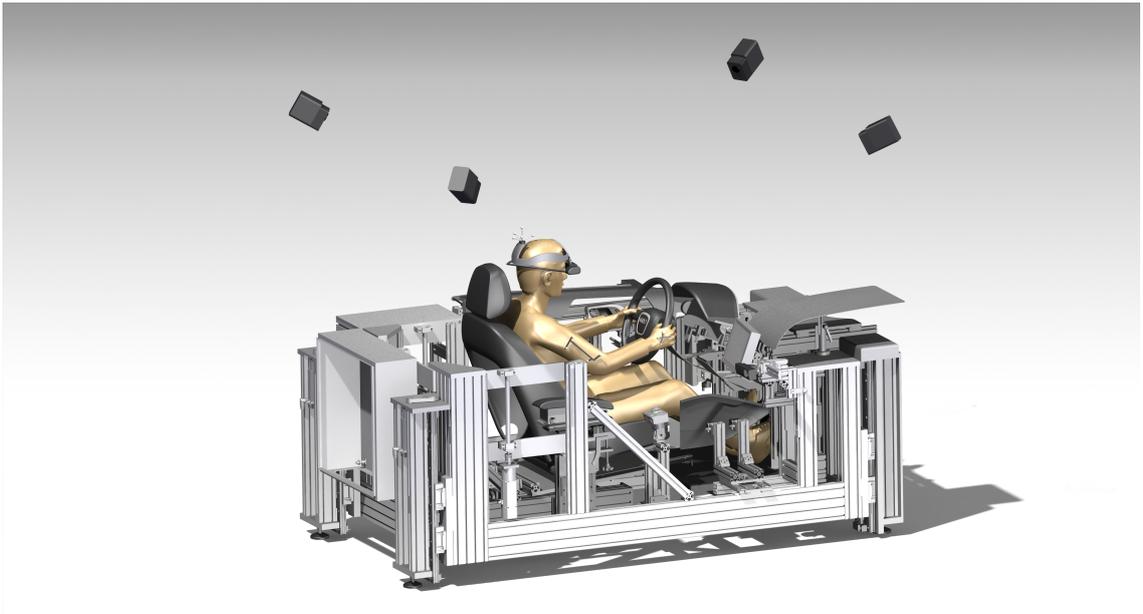


Abb. 2.17: Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells: Kombination der VR-Visualisierung über ein Head-Mounted Display mit einem variablen Ergonomieprüfstand

Braun (1999) entwickelt in seiner Arbeit einen variablen Ergonomieprüfstand und validiert eine zugehörige Arbeitsmethodik. Dieser variable Ergonomieprüfstand ist mittels seines modularen Adapterflächenkonzepts in der Lage, Fahrzeugabmessungen unterschiedlichster Maßkonzepte darzustellen und stellt damit ein Untersuchungswerkzeug für ergonomische Fragestellungen zur Verfügung. Da die technischen Möglichkeiten einer umfassenden haptischen Simulation nicht gegeben sind (vgl. Kapitel 2.3.2), wird als haptisches Display für das virtuelle Fahrerplatzmodell in der vorliegenden Arbeit daher ein variables Ergonomiemodell eingesetzt. Dieses ist im Wesentlichen ein Fahrerplatz-Mockup und dient der Nachbildung realer Fahrzeuginnenräume. Der große Vorteil dieses Modells liegt in der Variabilität, die eine Darstellung verschiedenster Innenraumkonzepte ermöglicht. Die Herausforderung liegt hier gegenüber konventionellen 1:1-Modellen in der Kompromissfindung zwischen Variabilität und realitätsgenauer Abbildung. Durch die Überlagerung des haptischen Feedbacks mit der Visualisierung des VR-Systems wird

der Abstraktionsgrad des variablen Modells deutlich reduziert.

Der kombinierte Ansatz gibt eine sehr gute Möglichkeit, den Fahrzeuginnenraum mit seinen Abmessungen und Parametern bereits frühzeitig zu erleben und zu bewerten. Die Elemente des Fahrerplatzes sind haptisch abstrahiert vorhanden und manipulierbar. Als variables Fahrzeugmodell wird ein Modellaufbau bestehend aus Metallprofilen entwickelt. In diesem Fahrerplatzmodell sind Sitz, Lenkrad, Pedalerie, Kombi-Display, Schaltung, zentrales Bedienelement, Mitteldisplay, Mittelarmlehne, Tür und Dach integriert. Es besteht die Möglichkeit, diese Elemente zu verstellen, zu entfernen oder weitere einzufügen. Dadurch ist es möglich, verschiedene Fahrzeugkonzepte darzustellen. Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 2.18 ersichtlich. Um die Variabilität der verstellbaren Komponenten zu ermöglichen, besteht das variable Fahrerplatzmodell in seinem Grundkonzept aus mit Führungen verbundenen Metallprofilen. Die Steuerung des Modells erfolgt über eine Schnittstelle zum CAD-System Catia V5. Um das variable Modell auf ein bestimmtes Fahrzeugkonzept einzustellen, werden die CAD-Daten von variablem Modell und des darzustellenden Fahrzeugkonzepts im CAD-System überlagert. Ausgangspunkt für eine Überlagerung ist dabei immer der Ferspunkt des Fahrers. Der somit erzeugte Parametersatz für die Verstellkomponenten wird anschließend auf das reale variable Fahrerplatzmodell übertragen.



Abb. 2.18: Aufbau des virtuellen Fahrerplatzmodells: das Fahrerplatz-Mockup zur haptischen Rückmeldung

Abbildung 2.17 zeigt schematisch auch das verwendete Trackingsystem. Das eingesetzte Trackingsystem ist ein optisches Infrarotsystem mit insgesamt sechs Infrarotkameras. Es zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit aus. Auch die Echtzeitfähigkeit ist bei derartigen Systemen gegeben. Die Orientierung und Position des HMD wird ausgelesen und in der virtuellen Szene mit der Position und Orientierung der Kameraperspektive gekoppelt. Somit wird die virtuelle Umgebung für den Anwender interaktiv erlebbar. Beim eingesetzten HMD handelt es sich um ein Gerät vom Typ Proview SR80 der Fa. Rockwell Collins (vgl. hierzu Kapitel 2.3.2 für die wesentlichen technischen Kennwerte). Zur weiteren Unterstützung der immersiven Einbindung des Anwenders in die virtuelle Umgebung sind zwei Datenhandschuhe (Cyberglove der Fa. Immersion) im System integriert. In Kombination mit einer Motioncapturing Erweiterung ist somit die Darstellung des eigenen Körpers in der virtuellen Umgebung umgesetzt. Die Motioncapturing Erweiterung basiert auf der Software Motionbuilder der Fa. Autodesk. Die Visualisierung erfolgt mit der Software Opticore Studio derselben Firma. Lenkrad, Sitz und weitere

## *2 Theoretischer Hintergrund*

Elemente des variablen Fahrerplatzmodells sind ebenfalls an das Trackingsystem angebunden. Damit wird auch deren Bewegung für den Anwender in der virtuellen Umgebung erlebbar.

Der dargestellte Aufbau des Gesamtsystems virtuelles Fahrerplatzmodell ist Forschungsgegenstand der im Folgenden beschriebenen Evaluierungsstudien.

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

Der Einsatz virtueller Technologien ist meist mit großen Investitionen verbunden. Das sich dabei ergebende Kosten-Nutzen-Verhältnis muss deshalb genau untersucht werden. Insbesondere der Nutzen derartiger Systeme spielt in dem entsprechenden speziellen Anwendungsfall dabei die entscheidende Rolle. Ein Ansatz sich dieser Thematik anzunehmen kann darin bestehen den Nutzen eines virtuellen Systems empirisch nachzuweisen und damit die Investitionen zu rechtfertigen. Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen stellen in ihrer logischen Abfolge ein Mittel dar, den Nutzen einer virtuellen Umgebung bei der ergonomischen Beurteilung eines Fahrerzeuginterieurs aufzuzeigen und gleichzeitig einen Ausblick auf den Mehrwert zu liefern, den derartige Systeme im Produktentwicklungsprozess liefern können. Es werden auch die Schwachpunkte des untersuchten Systems ermittelt und Ansätze aufgezeigt um diese auszugleichen. Als Bausteine zur Validierung werden dabei in den folgenden Kapiteln experimentelle Studien am vorgestellten virtuellen Fahrerplatzmodell beschrieben, die direkte Rückschlüsse auf Effizienz und Effektivität des entwickelten Werkzeugs zulassen. Die Untersuchungen zur Größenwahrnehmung, zur Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien und zur Sitzposition im eingesetzten System stellen dabei die Grundlage für dessen Potenzial als unterstützendes Werkzeug im Bereich ergonomische Auslegung eines Fahrzeuginterieurs dar (vgl. Abbildung 3.1).



Abb. 3.1: Bausteine der Validierung

Sie werden durch eine Untersuchung zu Entnahmebewegungen eines Bechers aus einem Becherhalter in virtuellen und realen Umgebungen und der hierfür entwickelten Systematik zur Erkennung von virtuellen Kollisionen ergänzt.

## 3.1 Versuch zur Größenwahrnehmung

Ziel des im folgenden Abschnitt beschriebenen Versuches ist die Untersuchung der VR-Umgebung „Virtuelles Fahrerplatzmodell“ hinsichtlich der Größenwahrnehmung im verwendeten Head-Mounted-Display. Für eine korrekte Beurteilung ergonomischer Inhalte in einem virtuellen Fahrzeuginnenraum ist es wichtig, dass die Raumwahrnehmung, insbesondere die Wahrnehmung der Größe verschiedener virtueller Objekte korrekt ist. Nur dann lassen sich die in der virtuellen Umgebung ermittelten Ergebnisse auf die Realität übertragen. Ergebnisse in vergleichbaren Studien kommen zu dem Ergebnis, dass es in den jeweils verwendeten VR-Systemen zu Fehlwahrnehmungen bezogen auf die Größe der virtuellen Objekte kommen kann (Hofmann, 2002). Die Größe dieser Unterschätzung wird als abhängig von zwei Faktoren beschrieben. Auf der einen Seite beeinflussen die eingesetzten Darstellungsmedien, wie HMD, Cave oder Powerwall, die Größenwahrnehmung des Anwenders, auf der anderen Seite hat auch die Untersuchungs-umgebung einen Einfluß. Vor allem Untersuchungs-umgebungen, die das nahe Umfeld des Anwenders betrachten, zeigen hier uneinheitliche Ergebnisse zur Größenwahrnehmung. Ziel der vorliegenden Studie ist es herauszufinden, inwieweit eine Fehlwahrnehmung bezogen auf die Größenwahrnehmung virtueller Objekte in dem verwendeten VR-System vorkommt und wie sich derartige Einflüsse verringern lassen. Die Ermittlung aller Einflussgrößen auf die Größenwahrnehmung ist ausdrücklich nicht Ziel des in den folgenden Abschnitten beschriebenen Versuches. Dazu wird auf dementsprechende Studien verwiesen u.a. Messing u. Durgin (2004, 2005) oder Creem-Regehr u. a. (2005).

### Motivation

In virtuellen Umgebungen kommen prinzipiell die gleichen Mechanismen zur Tiefen- und Raumwahrnehmung zum Einsatz wie in realen Umgebungen (vergleiche Kapitel 2.3.1. Nach (Hofmann, 2002) müssen dabei für virtuelle Umgebungen folgende Unterschiede beachtet werden:

- **Eingeschränktes Field-of-View:** Der Blickwinkel auf die virtuelle Szene ist eingeschränkt, die Displayflächen des im virtuellen Fahrerplatzmodell eingesetzten HMD erzeugen für den Nutzer ein einsehbares Sichtfeld von  $63^{\circ} \times 53^{\circ}$  (vgl. Tabelle 2.3)
- **Display Auflösung:** Die Auflösung der Darstellung ist durch das eingesetzte HMD technisch vorgegeben. (vgl. Tabelle 2.3)
- **Echtzeitfähigkeit:** Reicht die Systemleistung (Tracking, Visualisierung, Darstellung auf den Displays) nicht aus, die virtuelle Darstellung schnell genug an die Bewegungen des Nutzers anzupassen, kann es zu sogenannten „Nachzieheffekten“ kommen,

d.h. der Nutzer nimmt die virtuelle Darstellung mit einem spürbaren Zeitversatz wahr, Bewegung und Visualisierung passen nicht mehr zusammen.

- Ungenauigkeiten im Tracking: Treten bei der Messung der Kopfposition des Nutzers Fehler auf, dann wird die Visualisierung der virtuellen Szene aus einer falschen Perspektive berechnet, es kann auch zu Verzerrungen kommen.
- Akkomodations-Konvergenz-Konflikt: Die Akkomodation muss in virtuellen Umgebungen auf die Displayebene erfolgen, damit das Netzhautabbild scharf wahrgenommen wird. Objekte in verschiedener Entfernung werden hierbei alle gleichzeitig scharf dargestellt. Zudem kommt die Kopplung der Akkomodation mit der Konvergenz zum Tragen. Die bereits dargestellte Kopplung von Akkomodation und Konvergenz ist nicht mehr vollständig gegeben, da der technisch vorgegebene Abstand zur Displayfläche fix ist, sich der Konvergenzwinkel bei der Betrachtung verschieden weit entfernter Objekte aber ändert.
- einige bildliche Informationsquellen, wie atmosphärische Tiefe, werden softwarebedingt nicht dargestellt oder können verfälscht werden, etwa durch die Helligkeit des Displays.

Die dargestellten technischen Randbedingungen können die Wahrnehmung der virtuellen Umgebung beeinträchtigen, da die Auswertung der einzelnen Informationsquellen im Vergleich zur Realität verfälscht sein oder ihre Verlässlichkeiten anders bewertet werden können.

In vergleichbaren Untersuchungen zur Größenwahrnehmung in HMDs ist die Rede von Fehlwahrnehmungen in einer Größenordnung bis zu 20 %. Es kommt dabei sowohl zu Überschätzungen, als auch Unterschätzungen. Als Unterschätzung wird in diesem Zusammenhang folgender Zusammenhang verstanden: Ein Körper wird im VR System kleiner wahrgenommen, als er dargestellt wird. Abbildung 3.2 zeigt schematisch diesen Zusammenhang.

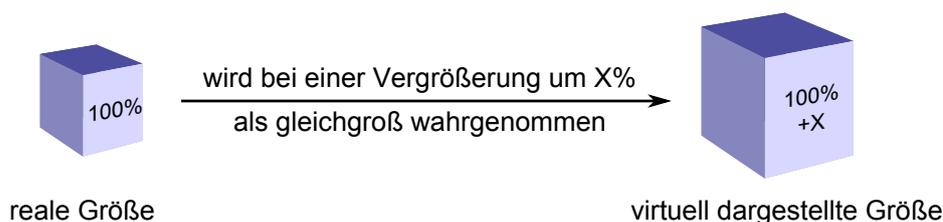


Abb. 3.2: Unterschätzung der Größe eines virtuell dargestellten Objekts

Als entscheidende Einflüsse kommen Faktoren aus zwei Bereichen in Frage. Beim ersten Bereich handelt es sich um das eingesetzte Darstellungsmedium für die virtuelle Umgebung, d.h. welches HMD wird in der VR-Umgebung eingesetzt, wie ist es an die

VR-Simulation angebunden, wie exakt sind die optischen Zusammenhänge des HMDs in der Visualisierungssoftware abgebildet. Auch Faktoren wie das Field-of-View oder die Geschwindigkeit der Displaysteuerung spielen hier eine Rolle. Der zweite Bereich behandelt die dargestellte VR-Umgebung selbst. Hier wird unterschieden in VR-Umgebungen, welche den intrapersonalen Raum darstellen, d.h. bis zu 2 m um den Nutzer, und VR-Umgebungen, bei denen der Fokus auf dem extrapersonalen Raum liegt. Unter extrapersonalem Raum wird ein Bereich größer 2m um den Nutzer verstanden. Im intrapersonalen Bereich schwanken die Ergebnisse zur Größenwahrnehmung sehr stark (siehe Kapitel 3.1.1). Weiterhin wird in den meisten Studien darauf hingewiesen, dass die jeweiligen Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere Systeme übertragen werden können. Auf Grund der Tatsache, dass es in der Literatur keine Studie zur Größenwahrnehmung mit dem hier verwendeten VR-System und seinen Komponenten gibt, wurde der im Folgenden beschriebene Versuchsaufbau konzipiert um die Größenwahrnehmung im verwendeten virtuellen Fahrerplatzmodell als Basis für alle weiteren Untersuchungen zu validieren.

#### 3.1.1 Vergleichbare Studien

Die Problematik von Fehlwahrnehmungen bezüglich der Größe virtueller Objekte ist prinzipiell in der Kognitionswissenschaft bekannt und wurde auch bereits in verschiedenen Veröffentlichungen untersucht. Im Folgenden sollen vor allem diejenigen Studien Erwähnung finden, die einen näheren Bezug zu den im „Virtuellen Fahrerplatzmodell“ eingesetzten Technologien aufweisen.

Gooch u. Willemsen (2002) berichten von einer Unterschätzung von Distanzen in HMDs von bis zu 38%. Ähnliche Ergebnisse werden auch von Phillips u. a. (2010) geschildert. Henry u. Furness (1993) weisen in ihren Untersuchungen Unterschätzungen bis zu 20% aus. Lampton u. a. (1995) berichten ebenfalls von Fehlwahrnehmungen zwischen 2% und 10%. Witmer u. Kline (1998) fanden Unterschätzungen bis zu 53%. Hingegen weisen die Untersuchungen von Witmer u. Sandowski (1998) auf eine mittlere Unterschätzung virtueller Objekte von ca. 15% hin. Den genannten Studien ist gemein, dass es sich vor allem um Untersuchungen der extrapersonalen Umgebung handelt. Als Tendenz ist erkennbar, dass es zu Unterschätzungen der Größe virtueller Objekte in diesem Untersuchungsraum kommt.

Als Beispiele für Studien zu Fehlwahrnehmungen im Nahbereich (direkter, überwiegend haptisch erreichbarer Einflußbereich nach Cutting u. Vishton (1995)) sind folgende Untersuchungen anzuführen: Surdick u. a. (1997) stellen allgemein hohe Genauigkeiten bei der Beurteilung virtueller Entfernungen in einem Bereich  $< 2\text{m}$  fest. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Ellis u. Menges (1998) in einem Bereich  $< 0,6\text{m}$ . Keyson (2000) berichtet dagegen von einer Unterschätzung der Entfernungen in virtuellen Umgebungen bis zu 15%. In den Studien von Waller (1999) werden sogar Überschätzungen von virtuellen Distanzen um 1-5% festgestellt. Auch bei den Studien von Engstler (2005) kommt es zu Unterschätzungen. Damit stellt sich für den nahen Bereich eine uneinheitliche Situation dar, da hier das Ergebnisspektrum von Unterschätzungen bis zu leichten Überschätzungen in virtuellen Umgebungen reicht.

Verschiedene Studien beschäftigen sich auch mit den Einschränkungen virtueller Um-

gebungen auf die Größenwahrnehmung. Messing u. Durgin (2005) haben beispielsweise untersucht inwieweit sich das begrenzte Gesichtsfeld in einem HMD auswirkt und dabei festgestellt, dass ein künstlich verringertes Gesichtsfeld in einer realen Umgebung keinen signifikanten Einfluß auf die Wahrnehmung von Entfernung und Größe hat. In einer Studie von Willemsen u. a. (2008) wurde untersucht inwieweit der in der VR-Simulation eingestellte Augabstand eine Auswirkung auf die Entfernungs- und Größenwahrnehmung hat. Es wurden zwei Ausprägungen dieses Faktors verglichen: die Anpassung der VR-Simulation an den jeweils gemessenen Augabstand des Anwenders und die Anwendung eines über alle Anwender gemittelten Augabstands. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fehlwahrnehmung in virtuellen Umgebungen davon unabhängig sind. Phillips u. a. (2010) zeigen in ihrer Studie, dass eine Körperdarstellung des Nutzers die Distanzwahrnehmung in einem Raum verbessern kann. Die Untersuchung bezieht sich dabei auf den extrapersonalen Raum und wurde mittels *direct walking task* durchgeführt. Mit der Körperdarstellung kommt es allerdings immer noch zu einer Unterschätzung von ca. 15%. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen sind die Studien von Creem-Regehr u. a. (2005) zu sehen. Hierbei wurde ebenfalls überprüft, ob die Raumwahrnehmung beeinflusst wird, wenn der Anwender seinen Körper bzw. seine Beine und Füße nicht sieht. Den Probanden wurde eine Art Halskrause angelegt, und damit die Sicht auf ihren Körper verdeckt. Es konnten dabei keine signifikanten Fehlwahrnehmungen nachgewiesen werden. Hofmann (2002) beschreibt in seiner Arbeit eine Lösung des Akkomodations-Konvergenz-Konflikt für ein HMD durch einen verschiebbaren Linsenmechanismus, damit ist theoretisch auch in einem HMD eine korrekte Akkomodation möglich, eine technische Umsetzung dieses Mechanismus ist allerdings nicht erfolgt. Sowohl Rokita (1996) als auch Hillaire u. a. (2007) beschreiben für die Lösung desselben Problems einen Algorithmus, der die Objekte, die sich vor bzw. hinter dem Fokuspunkt des Betrachters bzw. in dessen peripheren Sichtfeld befinden, unscharf darstellt. Zwar erfolgt die Akkomodation hierbei immernoch auf die Displayebene, die Interpretation des angezeigten Bildes soll den Akkomodationsvorgang dabei jedoch überlagern.

Verschiedene Autoren weisen explizit daraufhin, dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu Studien der Größenwahrnehmung in VR-Systemen nur eingeschränkt gegeben sind (u.a. Hofmann, 2002; Engstler, 2005). Als Basis für die weiteren Untersuchungen am virtuellen Fahrerplatzmodell müssen demnach mögliche Fehlwahrnehmungen quantifiziert und wenn möglich korrigiert werden.

#### 3.1.2 Ableitung des Versuchskonzepts

Zur objektiven Beurteilung der Größenwahrnehmung in VR-Systemen existiert bis dato kein Standard-Versuchsdesign oder Verfahren um die spezifischen Werte für ein VR-System festzulegen. Als Messmethoden werden in den zitierten Studien verschiedenste Ansätze verfolgt. Sehr weit verbreitet ist hierbei der sogenannte *direct walking task*. Bei dieser Methode prägen sich die Teilnehmer die Entfernung zu einem bestimmten Objekt ein, danach wird das Objekt ausgeblendet, bzw. die Teilnehmer schließen ihre Augen und versuchen anschließend solange zu diesem Objekt hin zu laufen bis sie denken es erreicht zu haben. Sahm u. a. (2005) vergleichen diese Methode mit einer Alternative, bei

der die eingeprägte Entfernung mittels Werfen eines Gegenstands reproduziert wird. Der Vergleich zeigt keine Abweichungen zwischen diesen beiden Messmethoden. Als weitere Messmethoden bei der die visuelle Wahrnehmung durch eine Bewegung wiedergegeben wird führt Hofmann (2002) das Anpeilen des eingepägten Standorts eines Zielobjekts aus mehreren Positionen an. Die genannten Messmethoden eignen sich allerdings nur für Untersuchungen im extrapersonalen Raum, die Anwendung für Studien im Fahrzeuginnenraum scheinen nicht zielführend.

Eine andere Gruppe von psychophysischen Messmethoden ist die verbale Wiedergabe der wahrgenommenen Größen oder Entfernungen: dies kann einerseits durch eine einfache verbale Beschreibung der Wahrnehmung durch den Probanden erfolgen, andererseits kann auch der Vergleich mehrerer Objekte durch den Probanden zielführend sein. Eine weitere Methode stellt das Erkennen und Suchen von Objekten dar, hierbei bestimmt der Proband ein Objekt anhand bestimmter Merkmale aus einer Gruppe von Objekten. Das Entdecken von Schwellen dient der Definition des kleinsten gerade noch merkbaren Unterschied verschiedener Reize. Und schließlich erwähnt Goldstein (2008) die direkte Größenschätzung, also die absolute Einordnung der Größe in einer metrischen Skala, als häufig verwendete psychophysische Messmethode. Am viel versprechendsten erscheint die Modifikation des Ansatzes von Hofmann (2002), der im Wesentlichen auf der Theorie der indirekten Skalierung im Herstellungsverfahren beruht. Die angewandte Methodik besteht im Kern aus einem sequentiellen Größenvergleich virtueller und realer Objekte. Hauptbestandteil ist das Angleichen der Größe bzw. das Skalieren eines virtuellen Objektes an ein vorher gesehenes reales Referenzobjekt. Mittels dieses Vorgehens soll eine qualitative Aussage für das subjektive Größenempfinden der Probanden in dem verwendeten VR-System ermittelt werden. Explizites Ziel der Studie ist nicht die Ermittlung der einzelnen Einflussfaktoren auf die subjektive Größenwahrnehmung in der VR-Umgebung, viel mehr soll zunächst ermittelt werden wie groß die Auswirkungen dieses Effektes in dem verwendeten Aufbau sind. Des Weiteren soll untersucht werden, ob die Größenwahrnehmung von einer Selbstrepräsentation des Anwenders in der virtuellen Umgebung profitieren kann, ob also diese Selbstrepräsentation den vermuteten Effekt der Unterschätzung ausgleichen kann. Die Ergebnisse von Phillips u. a. (2010) geben dazu erste Anhaltspunkte, allerdings bezieht sich deren Studie auf den extrapersonalen Raum und wurde mittels direct walking task durchgeführt. Es kommt trotz Körperdarstellung noch zu Unterschätzungen von ca. 15%.

Es wird folgende Hypothese aufgestellt, die in der Studie untersucht werden soll: Die subjektive Größeneinschätzung in der VR-Umgebung virtuelles Fahrerplatzmodell entspricht der theoretisch bestimmten Größendarstellung am besten, wenn die Nutzerwahrnehmung der VR-Umgebung durch ein möglichst hohes Maß an Selbstrepräsentation unterstützt wird.

#### 3.1.3 Versuchsbeschreibung

Im folgenden Abschnitt wird der Versuchsablauf beschrieben, dies beinhaltet insbesondere die Aufteilung in zwei Versuchsgruppen und die Beschreibung der unterschiedlichen Versuchsteile.

Zentraler Bestandteil der Untersuchung ist der sequentielle Vergleich der Größe des realen Modells eines Fahrzeuginnenraums mit einem virtuellen Modell. Es soll ermittelt werden, inwieweit die Probanden in der Lage sind die vorher eingeprägte Größe eines Fahrzeuginnenraums in der virtuellen Umgebung zu reproduzieren. Die weiteren Versuchsteile dienen im Wesentlichen zur Validierung dieses zentralen Bestandteils und werden im Folgenden erläutert.

Abbildung 3.3 zeigt den Versuchsablauf einleitend in einer kurzen Übersicht.

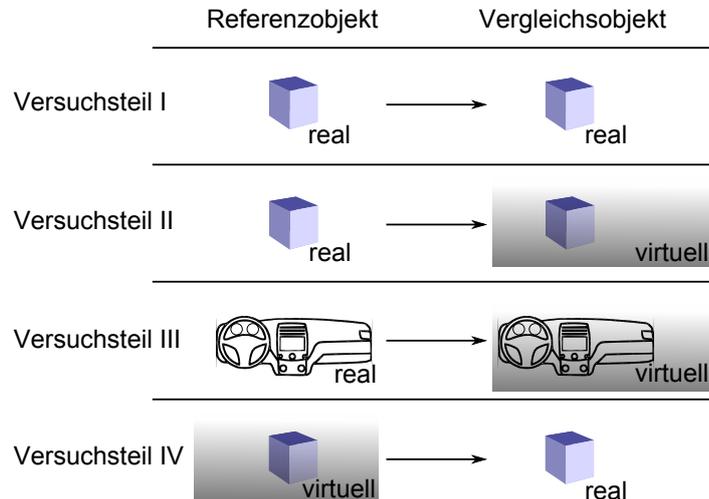


Abb. 3.3: Schematischer Aufbau des Versuchskonzepts

Versuchsteil I dient zur Evaluierung der Messmethode des sequentiellen Größenvergleichs. Es soll ermittelt werden, inwieweit die Probanden in der Lage sind, sich die Größe eines Referenzkörpers einzuprägen und diese Größe anschließend zu reproduzieren. Die hierbei ermittelte Verfälschung muss dann der Messmethode zugerechnet werden. Dies spielt insbesondere bei der qualitativen Beurteilung der Ergebnisse unter Einbeziehung der VR-Umgebung eine wichtige Rolle. Aus dem Resultat lassen sich Rückschlüsse auf systematische Fehlerkomponenten in den Versuchsteilen II und IV ableiten. Auf dieser Basis kann dann wiederum ein qualitativer Einfluß dieser Fehlerkomponenten auf Versuchsteil III beurteilt werden. Der Versuchsablauf im Versuchsteil I ist folgender: den Versuchspersonen (VP) wird ein Referenzkörper gezeigt und sie werden gleichzeitig vom Versuchsleiter aufgefordert sich die Größe dieses Körpers einzuprägen. Für das Einprägen der Größe wird den VP kein festes Zeitlimit vorgegeben. Es handelt sich beim Referenzkörper um einen Quader mit fest vorgegebener Größe (LxBxH in mm 250x200x150, siehe auch Abbildung 3.4). Engstler (2005) führt in seinen Studien einen direkten Größenvergleich mit Quadern, sowie Zylindern und Bohrungen durch. Die Kantenlängen der Quader im vorliegenden Versuch entsprechen den Dimensionen in diesen Vergleichsuntersuchungen und sind in ihren Dimensionen an typische Beurteilungssituationen in einem Fahrzeuginnenraum angepasst.

Der Referenzkörper wird anschließend aus dem Sichtfeld der Versuchspersonen entfernt, und es wird ihnen an der gleichen Position ein Vergleichskörper gezeigt. Die Ver-

gleichkörper sind Skalierungsstufen des Referenzkörpers. Der Skalierungsfaktor  $s$  dieser Skalierungsstufen berechnet sich nach folgender Formel:

$$s = 1 \pm i \cdot 0,04 \quad \text{mit } i = 0, 1, 2, \dots, 7$$

Die Studien von Engstler (2005) hatten das Ziel für die spezifisch untersuchte VR-Umgebung Wahrnehmungsschwellen bei der Größendifferenzwahrnehmung zu ermitteln. Die Wahrnehmungsschwelle liegt bei seinen Studien bei etwa 6mm (Größendifferenzwahrnehmung für Quader in einer Cave-Umgebung), und können somit ebenso wie die bei Hofmann (2002) verwendeten Skalierungsstufen als Anhaltspunkt für die vorliegende Untersuchung genommen werden.

Die VP werden befragt, ob die Größe des gezeigten Vergleichskörpers ihrem Empfinden nach dem Referenzkörper entspricht. Dies wird solange wiederholt bis die VP den Vergleichskörper mit der aus ihrer Sicht richtigen Größe identifiziert hat. Nimmt die Versuchspersonen einen Vergleichskörper als zu klein, d.h. kleiner als den Referenzkörper wahr, wird ihr im Anschluss die nächst größere Skalierungsstufe gezeigt, und umgekehrt. Die VP durchlaufen pro Versuchsteil vier derartige Durchgänge und beginnen jeweils bei den Skalierungsstufen 72%, 80%, 120% und 128%. Die Start-Skalierungsstufen werden in ihrer Reihenfolge über alle Probanden permutiert.

Versuchsteil II basiert auf einem ähnlichen Prinzip, bezieht allerdings das zu untersuchende Medium, das VR-System mit ein. Aufbauend auf den Ergebnissen aus Versuchsteil II, kann somit der Einfluss des VR-Systems auf die Skalierungsaufgabe und somit auf die eventuelle Fehlwahrnehmung ermittelt werden. Den Versuchspersonen wird wiederum der reale Referenzkörper gezeigt mit der Aufforderung sich die Größe einzuprägen. Anschließend wird der Referenzkörper entfernt. Den VP wird in der VR-Umgebung ein virtueller Vergleichskörper eingeblendet. Alle Quader werden den VP an einer festen Position innerhalb ihres Greifraums gezeigt bzw. eingeblendet. Sie liegen für alle Probanden am selben Ort. Damit die reale Entsprechung der Körper an der gleichen Position beurteilt und wahrgenommen werden kann, stehen die realen Referenzkörper auf eine Säule aus Plexiglas<sup>1</sup>. Die Skalierung der Vergleichskörper verläuft analog zu Versuchsteil I. Die Reihenfolge der jeweils zu Beginn gezeigten Skalierungsstufen wird ebenfalls permutiert.

Versuchsteil III wendet das Versuchsprinzip aus Versuchsteil II auf einen Fahrzeuginnenraum an. Die VP setzen sich in das Modell eines Fahrzeuginnenraums (Maßstab 1:1) und werden vom Versuchsleiter aufgefordert sich die Größe des Fahrzeuginnenraums einzuprägen. Sobald sie sich die Größe eingepägt haben, begeben sich die VP zurück in die VR-Umgebung und skalieren das virtuelle Modell des Fahrzeuginnenraums, das Skalierungszentrum wird in den Augpunkt der VP gelegt. Die Skalierung selbst verläuft analog zu den Versuchsteilen I und II.

---

<sup>1</sup>Um die äußere Einflußparameter aus der Bewertung auszuschließen wird die Beurteilung der realen Körper vor einem neutralen Hintergrund ausgeführt. Für die Untersuchung werden die Quader etwa auf Brusthöhe der Probanden innerhalb ihres Greifraums platziert. In der virtuellen Szene schweben die Quader scheinbar in dieser Lage. Die realen Körper stehen auf einer durchsichtigen Säule, somit wird der scheinbar schwebende Eindruck aus der virtuellen Umgebung auch in der realen Welt ermöglicht.

Der anschließende Versuchsteil IV kann als Kontrollversuch zu Versuchsteil II gesehen werden. Allerdings wird das Versuchsprinzip im Vergleich zu Versuchsteil II umgekehrt. Den VP wird ein virtueller Referenzkörper eingeblendet, dessen Größe sie sich einprägen sollen. Die Skalierung erfolgt dann analog zu Versuchsteil I wieder mit realen Vergleichskörpern. Skalierungsstufen und Anzahl der Wiederholungen verhalten sich wie in den übrigen Versuchsteilen. Abschließend füllen die VP einen Fragebogen aus. Neben allgemeinen demografischen Daten werden hier auch die Erfahrung mit dreidimensionaler computerbasierter Darstellung und VR-Systemen abgefragt (siehe Anhang A.1).

Neben der Quantifizierung des Verzerrungsfaktors der Größenwahrnehmung im VR-System, ist ein Ziel der Untersuchung herauszufinden, ob sich diese Verzerrung durch eine Selbstrepräsentation des Nutzers ausgleichen lässt. Aus diesem Grund werden für die Untersuchung zwei Versuchsgruppen eingeführt. Die erste Gruppe erlebt die VR-Szene nur mittels Head-Mounted Display, die zweite Gruppe bekommt zusätzlich eine Repräsentation der eigenen Hände eingespielt. Es handelt sich dabei um ein statisches Handmodell, dessen Größe auf die Handgröße der Benutzer angepasst wird. Die Zuteilung der Versuchspersonen auf die beiden Versuchsgruppen erfolgt zufällig. Es handelt sich folglich um zwei nicht verbundene Stichproben.

In der Literatur werden an einigen Stellen Unterschiede in der visuellen Raumwahrnehmung von Männern und Frauen aufgeführt, (z.B. Vecchi u. Girelli, 1998). Um unerwünschte Effekte zu vermeiden, wird dies bei der Auswahl der Untersuchungsteilnehmer berücksichtigt. Der Anteil männlicher bzw. weiblicher Versuchsteilnehmer entspricht mit 77% bzw. 23% der Teilnehmer dabei der Verteilung der Anwender des virtuellen Fahrerplatzmodellsmodells.

Bei der Probandenauswahl für diesen Versuch müssen auch die Ergebnisse von Sekuler u. Blake (1994) berücksichtigt werden, wonach etwa 5-10% der Gesamtbevölkerung von Problemen mit der Stereopsis<sup>2</sup> betroffen sind. Sehschwächen werden bei dieser Studie anhand eines Fragebogens aufgenommen. Das Probandenkollektiv weißt keine bekannten Sehschwächen auf. Die Verteilung der Versuchsteilnehmer hinsichtlich Alter, Geschlecht und Erfahrung mit VR-Systemen lässt sich Anhang A.2 entnehmen.

Als Referenz- und Vergleichsobjekte werden in den Versuchsteilen I, II und IV Quader mit einer Kantenlänge von 150x200x250 mm (HxBxL) verwendet. Die realen Entsprechungen sind aus Kunststoff gefertigt und werden zusätzlich zu dem verwendeten 1:1 Modell des Fahrzeuginnenraums in Abbildung 3.4 dargestellt.

#### 3.1.4 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der vier Durchgänge (mit jeweils unterschiedlichen Start-Skalierungsstufen) pro Versuchsteil werden für jede VP gemittelt und als Wert der Unter- bzw. Überschätzung des Referenz- bzw. Vergleichskörpers angesehen. Mittels des Ausreißertests nach Grubbs (Kanning, 2009) werden die einzelnen Ergebnisse eines Durchgangs

---

<sup>2</sup>Als Stereopsis bezeichnet man die Beeinträchtigung der Stereosehfähigkeit, welche z.B. durch Random-Dot-Stereogramme oder Anaglyphen festgestellt werden kann.



Abb. 3.4: Die beim sequentiellen Größenvergleich verwendeten Referenz- bzw. Vergleichskörper: realer Quader (links), die verwendeten realen Skalierungsstufen des Quaders (Mitte) und das reale 1:1-Modell des Fahrzeuginnenraums (rechts)

auf Ausreißerwerte überprüft. Entsprechende Werte aus einzelnen Durchgängen werden bei positivem Grubbstest<sup>3</sup> als Ausreißer angesehen und aus der weiteren Auswertung herausgenommen. Für den Grubbstest wird ein Signifikanzniveau von 5% festgesetzt.

Zunächst wird untersucht ob die Methode des sequentiellen Größenvergleichs für die Bewertung der Größenwahrnehmung von Probanden im dargestellten Versuchsaufbau geeignet ist. Hierfür werden die Ergebnisse aus Versuchsteil I betrachtet: Im Mittel entscheiden sich die Probanden für einen Vergleichskörper mit der Größe von 99,0% (mittlerer Fehler 2,3%<sup>4</sup>). Die Ergebnisse aus Versuchsteil I zeigen eine starke Tendenz zur Normalverteilung ( $p=.06$ , nach Lilliefors-Test, siehe auch Anhang A.2). Die Messmethode sequentieller Größenvergleich verursacht folglich im Mittel eine Überschätzung des Vergleichskörpers um 1% (vgl. auch Abbildung 3.5).

Als nächster Punkt soll ausgewertet werden, ob sich die Umgebung (real bzw. virtuell) auf die Ergebnisse der Größenwahrnehmung auswirkt. Zu diesem Zweck sollen die Ergebnisse aus den Versuchsanteilen I und II untersucht werden. Als **Nullhypothese  $H_{0,VTII}$**  wird postuliert:

*Die Größenwahrnehmung bei einem sequentiellen Größenvergleich ist unabhängig davon, ob die Untersuchung in einer realen oder virtuellen Umgebung durchgeführt wird.*

Die **Alternativhypothese  $H_{1,VTII}$**  lautet dementsprechend:

*In einer virtuellen Umgebung kann es bei der Größenwahrnehmung innerhalb eines sequentiellen Größenvergleichs zu Fehlwahrnehmung gegenüber einer realen Umgebung kommen.*

<sup>3</sup>Dieser Test ermittelt mögliche Ausreißer nicht starr nach prozentualer Abweichung vom Mittelwert, sondern bezieht die individuelle Streuung der Stichprobe in die Suche nach Ausreißern mit ein.

<sup>4</sup>Der mittlere Fehler (auch Standardabweichung  $s$ ) bezieht sich hier auf die Prozentskala des Versuchsaufbaus.

Im Versuchsteil II nehmen die Probanden die Vergleichskörper im Mittel in einer Größe von 102,4% (mittlerer Fehler 5,3%) wahr. Zur Identifizierung signifikanter Unterschiede zwischen den beiden Stichproben wird der T-Test nach Student zur Überprüfung von Mittelwertsdifferenzen (zweiseitige Abweichung) für gepaarte Stichproben herangezogen (Heller u. a., 1974). Das Signifikanzniveau wird auf 5% festgelegt. Aus der statistischen Auswertung ergibt sich ein signifikanter Unterschied ( $p < .01$ ) hinsichtlich der Ergebnisse aus Versuchsteil I und II. Damit konnte die Alternativhypothese  $H_{1,VTII}$  verifiziert werden. Die virtuelle Umgebung führt anscheinend zu einer Unterschätzung von etwa 3%. Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Streuung der Ergebnisse in der VR-Umgebung im Vergleich zur realen Umgebung aus Versuchsteil I deutlich größer ist (vgl. auch Abbildung 3.5).

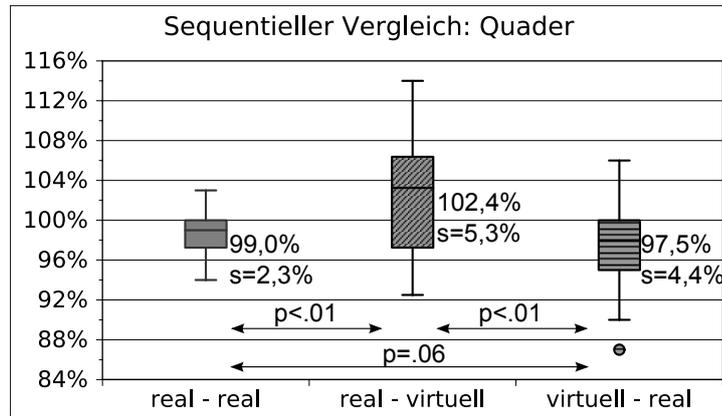


Abb. 3.5: Ergebnisse aus den Versuchsteilen I (links), II (Mitte) und IV (rechts): mittlere Größenwahrnehmung des Vergleichskörpers, mittlerer Fehler und Irrtumswahrscheinlichkeiten für errechnete Mittelwertsunterschiede aus T-Test (graphisch zusätzlich: Median, Quartile, sowie minimale und maximale Werte)

Folgende Ergebnisse stützen diese Annahmen zusätzlich: Wird die Reihenfolge der untersuchten Umgebungen umgedreht (Versuchsteil II  $\rightarrow$  Versuchsteil IV), sollten ähnliche Effekte sichtbar werden. Im Versuchsteil VI kommt es zu einer Fehlwahrnehmung um 1,5% im Vergleich zur Evaluierung der Messmethode in Versuchsteil I. Da in Versuchsteil IV der Referenzkörper virtuell dargestellt wird, äußert sich eine Unterschätzung in einem Ergebnis kleiner 100% (Mittelwert: 97,5%, Standardabweichung 4,4%). Die Absolutbeträge der Fehlwahrnehmung in den Versuchsteilen II und IV unterscheiden sich, hier müssen eventuelle Trainingseffekte berücksichtigt werden. Beim Versuchsteil IV haben die Probanden den sequentiellen Größenvergleich schon deutlich öfter durchgeführt<sup>5</sup>.

Im Folgenden interessiert, ob die Ergebnisse aus den Versuchsteilen mit dem Referenz- bzw. Vergleichskörper Quader auf Versuchsteil III übertragen werden können. Es soll untersucht werden, ob die Methode sequentieller Größenvergleich unabhängig von Art

<sup>5</sup>Dies gilt unter der Annahme, dass die hier verwendete Anwendung des sequentiellen Größenvergleichs im normalen Alltag einen eher selten vorkommende Mechanismus darstellt.

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

des Referenz- bzw. Vergleichskörpers (Quader oder Fahrzeuginnenraum) durchgeführt werden kann. Daraus ergibt sich die **Nullhypothese  $H_{0,VTIII}$**  :

*Bei der Größenwahrnehmung innerhalb eines sequentiellen Größenvergleichs in einer virtuellen Umgebung treten hinsichtlich der Art der Referenzkörper (Quader oder Fahrzeuginnenraum) keine Unterschiede im Bezug auf die Fehlwahrnehmung auf.*

Dementsprechend wird die **Alternativhypothese  $H_{1,VTIII}$**  formuliert:

*In einer virtuellen Umgebung kommt es bei sequentiellen Größenvergleichen abhängig vom eingesetzten Referenzkörper zu signifikanten Unterschieden bezüglich der Größe der Fehlwahrnehmung.*

Zur Überprüfung der Hypothesen wird wiederum der T-Test nach Student (zweiseitig) für gepaarte Stichproben eingesetzt. Für die gerade formulierten Hypothesen können nur die Wahrscheinlichkeiten des jeweiligen  $\alpha$ -Fehlers bestimmt werden (Bortz, 2005). Um die Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit der fälschlicherweise die Nullhypothese akzeptiert wird ( $\beta$ -Fehler), wird auf folgende Argumentation verwiesen: Übersteigt die  $\alpha$ -Irrtumswahrscheinlichkeit den Wert von 25%, kann dies nach Bortz (2005) als Anzeichen gewertet werden, die Nullhypothese mit akzeptabler Absicherung gegen einen  $\beta$ -Fehler anzunehmen. Dies darf allerdings nicht mit der Bestimmung der  $\beta$ -Irrtumswahrscheinlichkeit gleichgesetzt werden, liefert aber ein Indiz zur Hypothesenbeurteilung. Für den Versuchsteil III läßt sich folgendes Ergebnis vermerken: Im Mittel nehmen die Probanden das virtuelle Fahrzeuginnenraum in einer Größe von 102,2% (Standardabweichung  $s=4,0\%$ ) wahr. im Vergleich zu den Ergebnissen aus Versuchsteil II lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen ( $p=.90$ ). Auf Basis obiger Überlegungen läßt sich dies aus statistischer Sicht als Indiz für eine Bestätigung der Nullhypothese werten. Damit gibt es deutliche Anzeichen, dass sich die in den Versuchsteilen I, II und VI ermittelten Ergebnisse auch auf den Versuchsteil III übertragen lassen, der die Skalierung des Fahrzeuginnenraums untersucht.

Im Folgenden soll untersucht werden, ob eine Körperrepräsentation die subjektive Größenwahrnehmung im virtuellen Fahrerplatzmodell verbessert. Hierzu wird folgende (**Haupt-)**Nullhypothese  **$H_{0,H}$**  formuliert:

*Die subjektive Größenwahrnehmung in der VR-Umgebung virtuelles Fahrerplatzmodell ist unabhängig von der Selbstrepräsentation des Nutzers in der virtuellen Umgebung.*

Dementsprechend lautet die **Alternativhypothese  $H_{1,H}$**  :

*Die subjektive Größeneinschätzung in der VR-Umgebung virtuelles Fahrerplatzmodell entspricht der theoretisch bestimmten Größendarstellung deutlich besser, wenn die Nutzerwahrnehmung der VR-Umgebung durch eine Körper-Selbstrepräsentation unterstützt wird.*

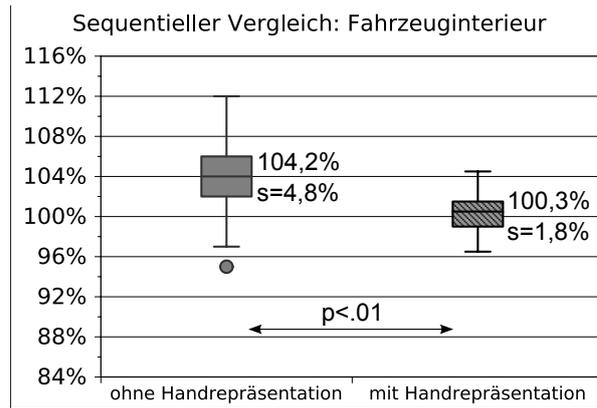


Abb. 3.6: Ergebnisse aus Versuchsteil III: Versuchsgruppe ohne Handrepräsentation (links) und Versuchsgruppe mit Handrepräsentation (rechts). Dargestellt sind mittlere Größenwahrnehmung des Fahrzeuginnenraums, mittlerer Fehler und Irrtumswahrscheinlichkeit für errechnete Mittelwertsunterschiede aus T-Test (graphisch zusätzlich: Median, Quartile, sowie minimale und maximale Werte)

Zur Untersuchung dieser Thesen werden die Versuchsergebnisse aus Versuchsteil III (Fahrzeuginnenraum) herangezogen. Es läßt sich feststellen, dass sich Probanden der Versuchsgruppe ohne Körperrepräsentation bei der Auswahl des für sie subjektiv richtigen Vergleichskörpers im Mittel für eine deutlich größere Skalierungsstufe des Fahrzeuginnenraums entscheiden (vgl. Abbildung 3.6).

Der T-Test nach Student für ungepaarte Stichproben (gleiche Varianzen<sup>6</sup>, einseitig) weist signifikante Unterschiede aus ( $p < .01$ ). Probanden ohne Körperrepräsentation entscheiden sich im Mittel für die Skalierungsstufe 104,2% ( $s = 4,8\%$ ) des Fahrzeuginterieurs, mit Handrepräsentation wird ein Ergebnis von 100,3% erzielt. Damit kann die Alternativhypothese  $H_{1,H}$  verifiziert werden. Es fällt zusätzlich auf, dass die Streuung der Versuchsgruppe mit Handrepräsentation kleiner scheint als die Streuung der Versuchsgruppe ohne Handrepräsentation. Berücksichtigt man die Ergebnisse aus Versuchsteil I, kann man folgern, dass die mittlere Unterschätzung der Größe des Fahrzeuginterieurs im virtuellen Fahrerplatzmodell etwa 1% beträgt (Differenz der Ergebnisse aus VT I und VT III *mit Handrepräsentation*).

Um den Einfluß der Handrepräsentation weitergehend zu untersuchen, wurden Korrelationen zwischen der Größe der Vergleichskörper Quader und Fahrzeuginnenraum jeweils mit und ohne Handrepräsentation bestimmt. Die zugehörigen Graphen sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Für die Ergebnisse aus den Versuchsteilen II und III ergeben sich nur niedrige Zusammenhänge ( $.00 > |r| \leq .40$ ), die Korrelationskoeffizienten (vgl. Heller u. a., 1974) betragen  $r_{\text{ohne Hand}} = .16$  und  $r_{\text{mit Hand}} = -.18$ .

Es wird wiederum deutlich, dass die Ergebnisse der Probanden beim sequentiellen Größenvergleich im Fahrzeuginterieur mit einer Handrepräsentation deutlich geringe-

<sup>6</sup>Die Gleichheit der Varianzen wurde mittels F-Test nach Fisher (vgl. Heller u. a., 1974) überprüft ( $p < .01$ ).

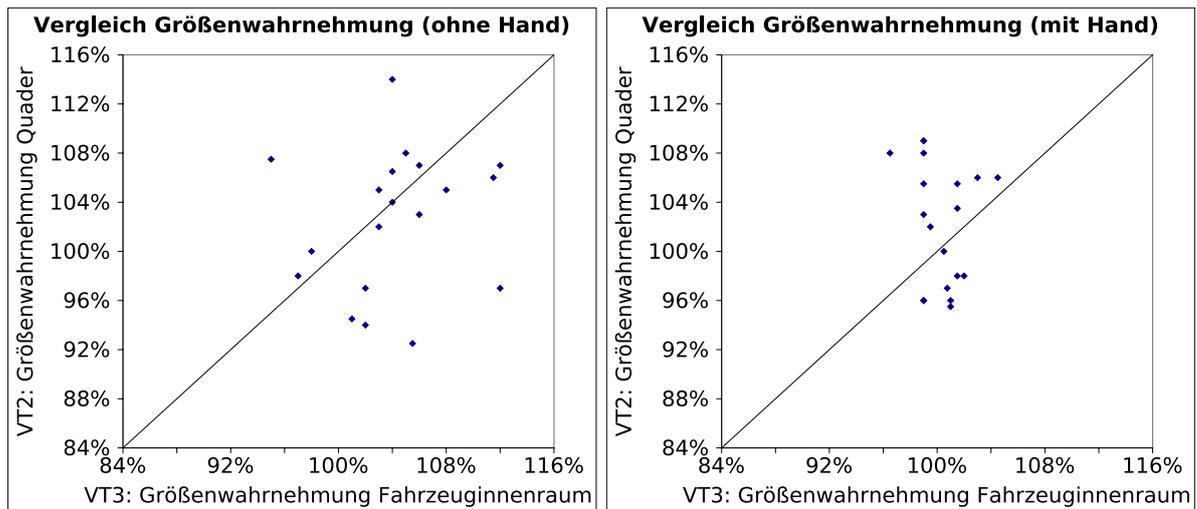


Abb. 3.7: Vergleich der Ergebnisse zur Größenwahrnehmung im virtuellen Fahrerplatzmodell bezüglich des Referenzkörpers (Quader bzw. Fahrzeuginterieur) und der Körperrepräsentation (mit bzw. ohne Handrepräsentation)

re Streuungen aufweisen, als bei dem Referenzkörper Quader bzw. dem sequentiellen Größenvergleich ohne Körperrepräsentation.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es im virtuellen Fahrerplatzmodell durchaus zu Fehlwahrnehmung im Sinne einer Unterschätzung bei der Größenwahrnehmung kommen kann. Diese Wahrnehmungsverzerrungen wurden mittels der Methodik des sequentiellen Größenvergleichs ermittelt und entsprechen den Ergebnissen vergleichbarer Untersuchungen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei rein visueller Nutzung mit einer Fehlwahrnehmung bis zu 5% zu rechnen ist, dieser Wert kann allerdings mit der Erweiterung der virtuellen Umgebung durch eine Selbstrepräsentation des Nutzers deutlich verringert werden. Unter Einsatz dieser Erweiterung konnten die Unterschätzungen auf etwa 1% dezimiert werden. Offenbar können die Nutzer ihre Körperrepräsentation in Form eines individuellen Größenmaßstabs nutzen und die in einer virtuellen Umgebung entstehenden Defizite bei der Größenwahrnehmung dadurch nahezu ausgleichen. Die Ergebnisse zeigen zusätzlich, dass interpersonelle Unterschiede verringert werden. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge stellt eine wichtige Basis für die weiteren Untersuchungen und den Einsatz des virtuellen Fahrerplatzmodells im Bereich von Ergonomiebewertungen eines Fahrzeuginterieurs dar. Die Nutzerrepräsentation in der virtuellen Umgebung spielt eine wichtige Rolle. Es ist zu erwarten, dass bei einem weiteren Ausbau der verwendeten Körperrepräsentation und bei einem zusätzlichen Ansprechen des haptischen Sinneskanals die Fehlwahrnehmung noch weiter reduziert werden kann (vgl. hierzu die Ergebnisse von Voß, 2008).

## 3.2 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien

Um das virtuelle Fahrerplatzmodell für ergonomische Untersuchungen eines Fahrzeuginterieurs zu validieren, müssen diesbezüglich die zuverlässig untersuchbaren Fragestellungen identifiziert werden. Grundsätzlich handelt es sich bei den potenziell geeigneten Fragestellungen um Themen, die im Sinne einer konventionellen Ergonomiebewertung mittels realer Prototypen oder 1:1-Modelle durchgeführt werden (vgl. hierzu auch Kapitel 2.2.2). In der im folgenden Abschnitt dargestellten Untersuchung wird gezeigt, wie eine geeignete Untersuchungsmethodik für derartige Evaluierungsstudien aufgebaut sein kann. Diese wird auf die relevanten Fragestellungen aus dem Bereich ergonomische Konzipierung eines Fahrzeuginnenraums angewandt und dadurch eine Eignung des Werkzeugs Virtuelles Fahrerplatzmodell hinsichtlich der Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen abgeleitet.

### Motivation

Für die Entwicklung von Fahrzeugen werden im Laufe des Entwicklungsprozesses mehrere physische Modelle unterschiedlichen Abstraktions- und Detaillierungsgrades im Maßstab 1:1 aufgebaut. Diese unterstützen insbesondere bei der Bewertung von Fragestellungen aus der Ergonomie. Die Erstellung eines solchen Modells ist sehr zeit- und kostenintensiv. Es stellt sich nun die Frage inwieweit sich derartige physische Prototypen durch virtuelle Pendanten ersetzen lassen. Dies setzt allerdings voraus, dass bei Steigerung der Effizienz durch die virtuellen Methoden ein mindestens gleich hoher Grad an Effektivität bei der Beurteilung ergonomischer Aspekte zustande kommt. In der im Folgenden beschriebenen Untersuchung soll diese Fragestellung wissenschaftlich untersucht werden. Zwar werden zum virtuellen Fahrerplatz vergleichbare Werkzeuge in der Fahrzeugentwicklung bereits eingesetzt, allerdings fehlt der objektive Nachweis der Verlässlichkeit und Qualität der daraus gewonnenen Erkenntnisse.

Häufig wird beim Einsatz von VR-Systemen nur der visuelle Sinneskanal angesprochen. Auch beim Einsatz auf dem Gebiet ergonomischer Untersuchungen wird dieser Ansatz häufig verfolgt (vgl. Kapitel 2.2.2). Im Folgenden soll untersucht werden, ob dieser Ansatz eine ausreichende Entscheidungssicherheit sicherstellen kann, oder ob bestimmte ergonomische Fragestellungen zusätzliche Erweiterungen benötigen. Im Folgenden wird das virtuelle Fahrerplatzmodell jedoch als rein virtuelles Modell ohne haptisches Feedback betrachtet. Der Nutzer sitzt zwar im Sitz des variablen Modells, erhält jedoch, außer durch das Lenkrad, keine Unterstützung durch die Elemente des variablen Modells. Das einzige haptische Feedback erfolgt durch die Kontur des Sitzes und das Lenkrad.

Ziel ist es, Themengebiete zu identifizieren, die zuverlässig im virtuellen Modell untersucht werden können und Randbedingungen zu ermitteln, innerhalb derer man die in der virtuellen Umgebung ermittelten Ergebnisse, auf Realfahrzeuge übertragen kann.

### 3.2.1 Vergleichbare Studien

Voß (2008) zeigt in seiner Arbeit zwei Evaluierungsansätze für virtuelle Umgebungen

zur Beurteilung eines Fahrerarbeitsplatzes auf. Neben den von ihm ausführlich durchgeführten Studien zu Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung, führt er auch subjektive und individuelle Bewertungen einiger ergonomischer Fragestellungen durch. Beim Untersuchungsteil zur Divergenz kommt er zu dem Ergebnis, dass die Integration eines haptischen Feedbacks nur hinreichend genau sein muss, da nach seinen Untersuchungsergebnissen der Mensch die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung wesentlich schlechter erkennt als rein visuelle bzw. rein haptische Unterschiede<sup>7</sup>. Damit werden Grundanforderungen an einen derartigen Prüfstand definiert. Die Untersuchungen zur Beurteilungssicherheit beruhen auf einem Vergleich subjektiver Bewertungen in einem virtuellen Modell und einem entsprechenden realen Modell und sind als heuristische Evaluation durch Experten mit kleiner Stichprobe zu klassifizieren. Voß (2008) läßt insgesamt 12 Untersuchungsobjekte von 12 Experten bewerten und teilt dabei die ergonomischen Fragestellungen in Sichtuntersuchungen und Greifuntersuchungen, die an jeweils sechs Elementen überprüft werden. Konkrete Untersuchungskriterien sind beispielsweise Sichtbarkeit eines Displays, Auffindbarkeit des Klimabedienteils oder Nutzbarkeit der Armauflage. Daneben werden auch die subjektiven Faktoren Raumgefühl und Kopffreiheit wie die übrigen Fragestellungen anhand einer Schulnotenskala bewertet. In der Analyse der Ergebnisse werden die Mittelwerte der Benotungen der einzelnen Elemente im realen Modell und virtuellem Modell miteinander verglichen. Als Ergebnis stellt Voß (2008) fest, dass die von ihm durchgeführten Sichtuntersuchungen in der virtuellen Umgebung größtenteils zu den gleichen Ergebnissen führen wie im realen Modell<sup>8</sup>. Unterschiede treten danach nur auf, wenn für Bewertungsaufgaben ein großes FoV oder eine umfassende haptische Rückmeldung notwendig sind.

Für die einleitend dargestellte Fragestellung stellt das vorgestellte Untersuchungskonzept nur bedingt eine Lösung dar, da die Validierung des Untersuchungsmediums hauptsächlich subjektiv durch die Probanden bewertet wurde. Das Zusammenspiel dieser Untersuchungsmethodik mit der geringen Anzahl an Untersuchungsobjekten beeinträchtigt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Untersuchungsobjekte. Desweiteren wird keine qualitative Einordnung der Bewertungskriterien im Sinne einer Zuverlässigkeitsabschätzung oder Fehlerrate für eine virtuelle Umgebung getroffen. Aus diesem Grund wird im Folgenden detailliert der Ansatz von Gude (2004) erläutert. Gude (2004) stellt in seiner Arbeit die Ergebnisse eines Laborexperiments dar, in welchem die Probanden die Aufgabe hatten, mit Hilfe verschiedener virtueller Umgebungen einen Bildschirmarbeitsplatz auf ergonomische Gestaltungsmängel zu untersuchen. Die in diesen Umgebungen erzielte Beurteilungsleistung vergleicht er mit der einer weiteren Probandengruppe, die eine äquivalente Untersuchung an einem realen Bildschirmarbeits-

---

<sup>7</sup>Die von Voß (2008) ermittelten Wahrnehmungsschwellen liegen bei 6mm für eine translatorische Divergenz und bei 2° für eine rotatorische Divergenz (jeweils 5%-Schwelle).

<sup>8</sup>Im Detail führt Voß (2008) hier für den Themenbereich Sichtuntersuchungen die Sicht auf das Kombiinstrument, die Lage und Sichtbarkeit des Mitteldisplays, die Auffindbarkeit des Klimabedienteils, die Sichtbeeinträchtigung durch Säulen sowie das Raumgefühl an. Als Greifuntersuchungen nennt er die Erreichbarkeit der Fensterheber, die Nutzbarkeit der Armauflage, die Erreichbarkeit der Cupholder sowie die Erreichbarkeit des Klimabedienteils.

platz durchführte. Um die jeweilige Beurteilungsleistung zu ermitteln greift er auf eine Methodik aus der Signalentdeckungstheorie zurück. Im Wesentlichen beruht seine Studie darauf, ergonomische Gestaltungsmängel in die Versuchsumgebung einzubauen und von den Probanden die Bildschirmarbeitsplätze in den jeweiligen Untersuchungsmedien aus ergonomischer Sicht bewerten zu lassen. Somit lassen sich die verschiedenen Untersuchungsmedien anhand der Beurteilungsleistung hinsichtlich der Bewertbarkeit ergonomischer Aspekte vergleichen. Aus den beiden dargestellten Versuchskonzepten leitet sich die Methodik ab, die zur Validierung des virtuellen Fahrerplatzmodells eingesetzt wird.

### 3.2.2 Ableitung des Versuchskonzepts

Das Erleben einer virtuellen Umgebung wird vorrangig von der Wahrnehmung und den Eindrücken des Nutzers bestimmt. Diese sind individuell verschieden. Um dennoch zu messbaren und aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen, findet man in der Psychologie zahlreiche Methoden. Gude (2004) greift in der oben zitierten Studie auf ein Verfahren zurück, welches auf der Theorie der Signalentdeckungstheorie basiert. Dieser wissenschaftliche Ansatz, der erstmals von Swets u. Green (1966) vorgestellt wurde, kann als Analysemethodik zum Auffinden bestimmter Signale dienen. Es lässt sich daraus ein Qualitätsmaßstab des zur Detektion verwendeten Systems ableiten. Im Originalexperiment spielten Swets u. Green (1966) ihren Probanden Geräusche vor. Ein Teil der Geräusche enthielt einen kaum wahrnehmbaren Ton, der Rest nur Rauschen. Aufgabe der Versuchspersonen war es nun anzugeben, ob sie einen Ton gehört haben oder nur Rauschen. Offensichtlich ist die dabei erzielte Leistung abhängig von der Unterscheidbarkeit des Signals zum Rauschen, andererseits können auch verschiedene andere Einflußfaktoren mit dieser Methodik untersucht werden. Tabelle 3.1 zeigt die möglichen Entscheidungsfälle dieser Methodik auf. Es kann ein Signal vorhanden sein oder nicht und die Versuchsperson kann eine Entdeckung melden oder nicht.

	Entscheidung der Versuchsperson	
	positiv	negativ
<b>Signal bzw. Reiz</b>	Treffer richtige Entscheidung	Verpasser Fehlertyp 1: $\alpha$ -Fehler
<b>kein Signal oder Reiz (Rauschen)</b>	falscher Alarm Fehlertyp 2: $\beta$ -Fehler	korrekte Zurückweisung richtige Entscheidung

Tab. 3.1: Entscheidungsfälle der Signalentdeckungstheorie nach Swets u. Green (1966)

Die Detektionsleistung kann als die relative Häufigkeit der Treffer und falschen Alarme ermittelt werden. Dabei ist allerdings auch die Antworttendenz zu berücksichtigen. Unter der Antworttendenz wird in diesem Zusammenhang die tendenzielle Reaktion eines Probanden im Zweifelsfall verstanden: Entscheidet sich der Proband hierbei eher dafür, das Signal entdeckt zu haben, spricht man von einem liberalen Antwortverhalten, im anderen Fall von einem konservativen.

Gude (2004) greift in seiner Studie zur arbeitswissenschaftlichen Bewertung von Büroarbeitsplätzen in einer virtuellen Umgebung die Methode der Signalentdeckungstheorie auf. In seinem Versuch vergleicht er einen realen mit einem virtuellen Büroarbeitsplatz. In der Studie wird untersucht, ob arbeitswissenschaftliche Untersuchungen von Arbeitsplätzen präventiv in einer virtuellen Umgebung durchgeführt werden sollten. Sowohl für die virtuelle wie auch für die reale Szene bringt er die gleichen Gestaltungsmängel ein. Dabei ist ein vorhandener Gestaltungsmangel als Signal zu bewerten. Ist kein Gestaltungsmangel installiert, liegt der Fall des Rauschens vor.

Dieses Vorgehen soll als Grundlage für die Untersuchungsmethodik in der vorliegenden Studie verwendet werden, da es objektive Rückschlüsse auf die Bewertbarkeit ergonomischer Untersuchungsinhalte im virtuellen Fahrerplatzmodell ermöglicht und diese gleichzeitig qualitativ einordnet. Das virtuelle Modell dient dabei als Versuchsobjekt, während ein reales physisches Fahrzeugmodell als Referenzobjekt verwendet wird. In beide Modelle werden die gleichen Gestaltungsfehler eingebracht. Es wird untersucht, inwiefern die Fehler in beiden Modellen von den Probanden entdeckt werden und für welche Fragestellungen Unterschiede entstehen. Dabei wird ein vorhandener Gestaltungsmangel als Signal definiert. Ist kein Gestaltungsmangel installiert, liegt der Fall des Rauschens vor<sup>9</sup>. In Form eines Fragebogens werden die Antworten der Probanden dokumentiert. Es ergeben sich folgende Entscheidungsfälle (vgl. Tabelle 3.2): Antwortet die Versuchsperson auf die Frage ob ein bestimmtes Element im Fahrzeuginterieur subjektiv ergonomisch korrekt ausgelegt ist mit „Nein“, so wird bei vorhandenem Gestaltungsmangel ein Treffer erzielt. Ist kein Mangel vorhanden, wird diese Antwort als falscher Alarm gewertet. Antwortet die Versuchsperson mit „Ja“ ergibt sich für den Fall eines Gestaltungsmangels ein Verpasser. Eine korrekte Zurückweisung erhält man für den Fall, dass kein Mangel vorhanden ist. Somit lassen sich für beide Modelle eine Mängel-Detektionsleistung als relative Häufigkeit der Treffer und falschen Alarme ermitteln und statistisch auswerten.

	Entscheidung der Versuchsperson	
	Mangel erkannt	kein Mangel erkannt
Gestaltungsmangel vorhanden	Treffer richtige Entscheidung	Verpasser Fehlertyp 1: $\alpha$ -Fehler
kein Gestaltungsmangel vorhanden (Rauschen)	falscher Alarm Fehlertyp 2: $\beta$ -Fehler	korrekte Zurückweisung richtige Entscheidung

Tab. 3.2: Entscheidungsfälle der Signalentdeckungstheorie angepasst auf die vorliegende Studie zur Entdeckung von Gestaltungsmängeln in einem Fahrzeuginterieur

Ziel der Untersuchung ist es, alle relevanten Anzeige- und Bedienelemente des Fahrerarbeitsplatzes hinsichtlich ihrer ergonomische Bewertbarkeit in der virtuellen Umgebung mit der aufgezeigten Methodik zu untersuchen. Die Auswahl dieser Elemente wird im Folgenden beschrieben. Zunächst werden die Elemente des Fahrzeuginterieurs nach Art

<sup>9</sup>Im ursprünglichen Versuchsdesign wurde unter „Rauschen“ das tatsächliche Rauschen in einem Audiosignal verstanden, heute versteht man unter diesem Begriff alle denkbaren Störeinflüsse.

des Elements, ergonomischen Bewertungskriterien und Position des Elements im Fahrzeug kategorisiert. Mit Hilfe einer Nutzwertanalyse und dieser Kategorisierung werden wichtige Vertreter aus allen Elementen extrahiert. Diese wichtigen Vertreter stellen im Weiteren die Untersuchungsobjekte dar, auf deren Basis dann die Gestaltungsmängel im Fahrzeuginterieur und der zur Untersuchungsmethodik passende Fragebogen ausgearbeitet werden. Abbildung 3.8 zeigt die Auswahl der Untersuchungsobjekte als sinnvolle Schnittmenge aus Anzeigen, Bedienelementen und Ablagen im Fahrzeuginterieur und den ergonomischen Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit.

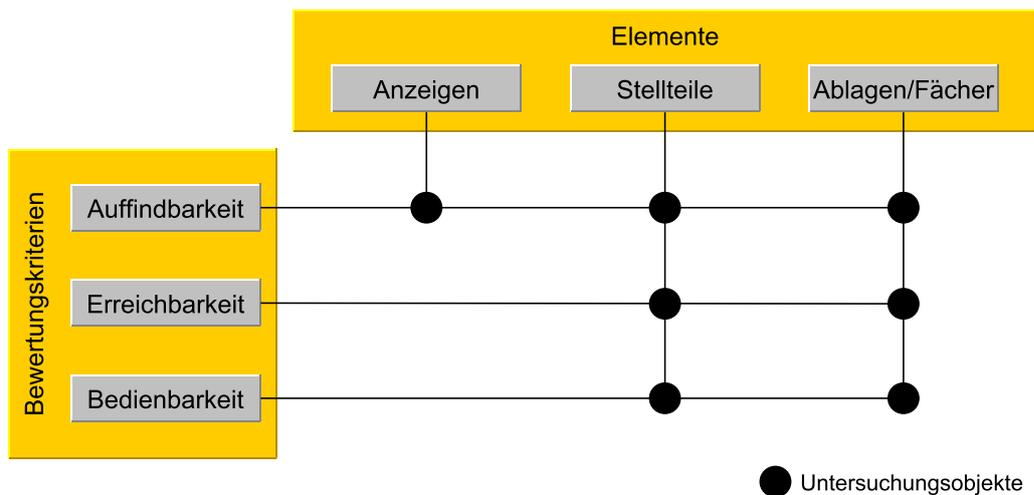


Abb. 3.8: Übersicht der Untersuchungsobjekte als sinnvolle Schnittmenge aus Anzeigen, Bedienelementen und Ablagen im Fahrzeuginterieur und den ergonomischen Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit

Die für diese Untersuchung verwendeten ergonomischen Bewertungskriterien werden dabei wie folgt definiert:

Die **Auffindbarkeit** ist der rein visuelle Eindruck, ob ein Element gesehen bzw. entdeckt wird. Alle Elemente des Fahrerplatzes können hinsichtlich ihrer Auffindbarkeit untersucht werden (vgl. Abbildung 3.8). Eingeschränkt wird die Auffindbarkeit durch Verdeckungen und ungewohnte Positionen der Elemente.

Unter **Erreichbarkeit** versteht man das Herankommen an ein Element, sodass dieses berührt werden kann. Maßgebend sind hierfür in der vorliegenden Untersuchung neben der Handreichweite des Fahrers und Position des Fahrers im Fahrzeug die Lage des jeweiligen Elements sowie die für das Stellteil spezifische Greifart. Die hier untersuchten Greifarten sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Eine gute Erreichbarkeit ist vor allem für Stellteile und Ablagen entscheidend (vgl. Abbildung 3.8).

Die **Bedienbarkeit** wird als das korrekte Gebrauchen eines Elements gemäß seiner Funktion definiert. Haupteinflussfaktoren sind hier Form, Größe und Zuschnitt der Elemente. Die Bedienbarkeit soll hier ganz explizit unabhängig von der Erreichbarkeit der

Elemente untersucht werden und stellt im Vergleich dieser beiden ergonomischen Bewertungskriterien das komplexere Beurteilungskriterium dar.

Im Gegensatz zur Auffindbarkeit werden die beiden letzteren Bewertungskriterien in der Realität unter Zuhilfenahme sowohl des visuellen als auch des haptischen Sinneskanals beurteilt. In einer virtuellen Umgebung erhöhen diese beiden Bewertungskriterien daher die Komplexität einer vollständigen Simulation. Es gilt zu untersuchen, in welchem Maße die visuelle Bewertbarkeit von Erreichbarkeit und Bedienbarkeit ausreicht bzw. bei welchen Fragestellungen eine haptische Simulation unabdingbar ist.

Untersuchungen zur Lesbarkeit sind auf Grund technischer Grenzen hinsichtlich der Auflösung des HMD in der virtuellen Umgebung nicht sinnvoll. Jedoch können die Elemente immer klar identifiziert werden, daher tritt für die übrigen Untersuchungsaspekte keine Beeinträchtigung auf.

Eine Übersicht der aus diesen Definitionen abgeleiteten Untersuchungsobjekten zeigt Abbildung 3.8. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass für die Stell- und Bedienteile eine weiter Untergliederung nach Greif- und Stellteilarten notwendig ist (DIN 894-3, 2000). Tabelle 3.3 zeigt die weitere Aufgliederung der relevanten Stellteile des Fahrerarbeitsplatzes.

Stellteiltyp	Greifart	Verwendung (exempl.)
<i>translatorisch-diskrete Stellbewegungen</i>		
Einzelstastknopf	Kontaktgriff, Finger senkrecht	Warnblinktaste
Flachkipphebel	Zufassungsgriff, Finger senkrecht	El. Fensterheber
Kipphebel	Zufassungsgriff, Finger senkrecht	Schaltung
Zuggriff	Zufassungsgriff, Hand senkrecht	Türinnenbetätigung
Handgriff	Umfassungsgriff	Handbremse
<i>rotatorisch-diskrete Stellbewegungen</i>		
Rundknopf	Zufassungsgriff, Finger tangential	Außenspiegelverstellung
Drehknebel	Zufassungsgriff, Finger senkrecht	Lichtdrehschalter
<i>rotatorisch-kontinuierliche Stellbewegungen</i>		
Drehsteller	Kontaktgriff, Daumen tangential	Drehsteller am Radio
Drehknopf	Zufassungsgriff, Finger tangential	Zentrales Bedienelement
Kurbel	Zufassungsgriff, Hand senkrecht	mech. Fensterheber
Handdrehsteller	Zufassungsgriff, Hand tangential	mech. Sitzverstellung
Handrad	Umfassungsgriff, Hand tangential	Lenkrad

Tab. 3.3: Stellteile nach Stellteiltyp und Greifart nach DIN 894-3 (2000)

Greif- und Sichtbereiche des Fahrers sind weitgehend symmetrisch zu einer durch den Fahrer gehenden in Fahrzeuginnenrichtung verlaufenden vertikalen Ebene angeordnet (vgl. Abbildung 3.9 und Abbildung 2.12). Dieser Zusammenhang kann bei der Bewertung der genannten ergonomischen Bewertungskriterien hinsichtlich der Position der untersuchte Elemente ausgenutzt werden.

Für den weiteren Versuchsaufbau werden relevante Vertreter der Untersuchungsobjekte ermittelt, die in der Studie untersucht werden können:

### 3.2 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien

- Lenkrad
- Lichtbedienschalter
- Bedienelement zur Lenkradeinstellung
- Bedienelement auf dem Lenkrad
- Lenkstockschalter
- Zündschloß bzw. Start-Stop-Taster
- Schaltung
- Zentrales Infotainment-Bedienelement
- Mittelarmlehne
- Warnblinktaster
- Handbremse
- Klimaanlage Bedienelement
- Radio Bedienelement
- Innenbeleuchtung
- Innenspiegel
- Türöffner (innen)
- Fensterheber
- Zentralverriegelung
- Armauflage Türe
- Außenspiegelverstellung
- Türzuziehgriff
- Sitzverstelleinheit
- Kombi Display
- Mitteldisplay
- Anzeige Radio
- Cupholder
- Handschuhkasten

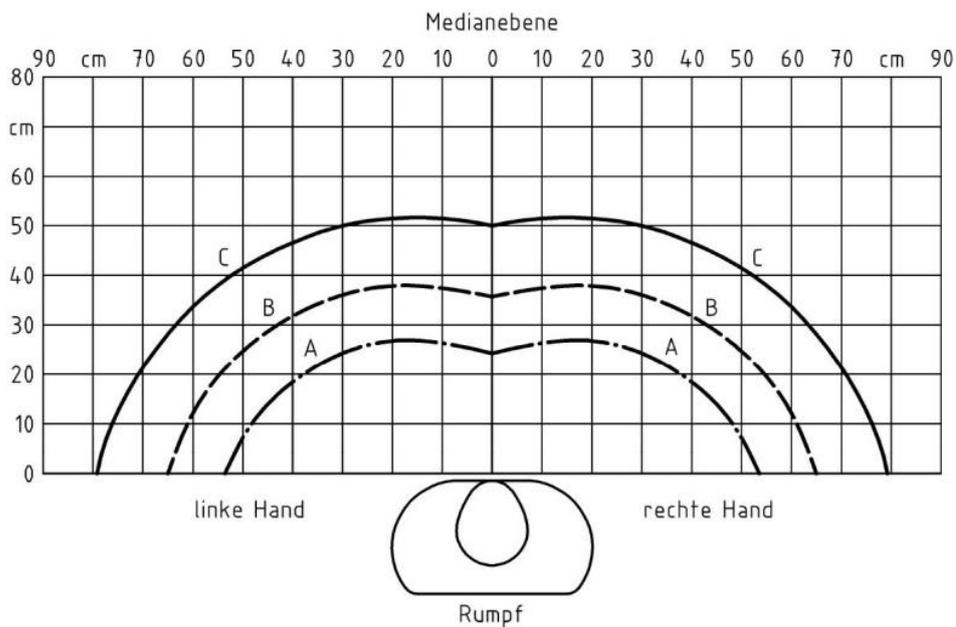


Abb. 3.9: Greifbereiche des Menschen nach DIN 15996 (2006)

### 3.2.3 Versuchsbeschreibung - Details zu Durchführung und Auswertung

Die aus der Signalentdeckungstheorie abgeleitete Versuchsmethodik ermöglicht es, objektive Aussagen zur Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen treffen zu können, hierfür wird das virtuelle Fahrerplatzmodell mit einem realen Fahrerplatzmodell als Referenz vergleichend untersucht. In den beiden Modellen des gleichen Fahrzeuges werden Gestaltungsmängel installiert. Den Probanden werden Fragen zu den zu untersuchenden Eigenschaften (Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit) gestellt. Bei den Fragestellungen handelt es sich um geschlossene Fragen, die nur zwei Antwortmöglichkeiten zulassen: „ja“ oder „nein“. Sie sind nach folgendem Muster aufgebaut:

#### *Exemplarische Fragestellung: Frage 1*

Erläuterungen	Keine Kopf und/oder Oberkörperbewegung erlaubt. VP: Bestätigen der Auffindbarkeit des Elements durch Zeigen.
Situation	Taste ist verdeckt, Gestaltungsmangel
Frage	Ist der Start-Stopp-Taster auffindbar?
Antwort der VP	Ja bzw. Nein

#### *Exemplarische Fragestellung: Frage 2*

Erläuterungen	VP: Bestätigen der Auffindbarkeit des Elements durch Zeigen.
Situation	Taste ist gut sichtbar, kein Gestaltungsmangel
Frage	Ist die Taste zur Betätigung des Warnblinkers auffindbar?
Antwort der VP	Ja bzw. Nein

Durch die vorgegebenen Antwortmöglichkeiten und das Vorhandensein oder nicht Vorhandensein eines Gestaltungsmangels ergeben sich die vier in der Versuchsmethodik vorgesehenen Antwortmöglichkeiten (vgl. Tabelle 3.2). Die Fragen sind in positiver Form formuliert.

Im Versuchsaufbau enthalten etwa die Hälfte aller Untersuchungsobjekte einen Gestaltungsmangel, welche dies sind, ist den Versuchsteilnehmern nicht bekannt. Die Grundlage für die jeweilige Ausprägung der Mängel stellen Anforderungen aus Normen und weiteren Literaturquellen dar (vgl. u.a. DIN 33402-2, 2006; ISO 4040, 2009). Im Versuch sind Sitz- und Lenkradeinstellung für jeden Probanden voreingestellt und fixiert. Nur so kann die Eindeutigkeit der Gestaltungsmängel sichergestellt werden. Durch verschiedene Restriktionen hinsichtlich der zulässigen Oberkörper- oder Kopfbewegung im Versuch, werden eindeutige Situationen geschaffen. Es wird hierbei eine Bewegung der Schultern (gelöste Schultern) und eine leichte Oberkörperbewegung, bei der die Lendenwirbelsäule weiterhin mit der Rückenlehne des Sitzes in Kontakt bleibt unterschieden. Sollte die Vpn z.B. den Oberkörper dennoch bewegen, wird sie darauf hingewiesen und muss die Aufgabe erneut bearbeiten. Ist es der Vpn nicht möglich, die Aufgabe wiederholt ohne Oberkörperbewegung zu erfüllen, gilt die betreffende Frage als mit „Nein“ (nicht erreichbar bzw. nicht auffindbar) beantwortet. Alle betrachteten Be-

wertungskriterien werden unabhängig voneinander untersucht. Eine Übersicht zu allen installierten Gestaltungsmängeln befindet sich in Anhang B.4. Im Folgenden werden exemplarisch einige Gestaltungsmängel beschrieben. Ein Gestaltungsmangel zur Auffindbarkeit ist beispielsweise als Verdeckung des Blinkerhebels und der Start-Stopp-Taste durch die Verstärkung des Lenkradholms dargestellt. Durch die Veränderung der Hutze wird ein Teil des Kombi-Displays verdeckt (vgl. Abbildung 3.10). Nach ISO 4040 (2009) muss die Geschwindigkeitsanzeige im Kombidisplays ohne Kopfbewegung immer sichtbar sein. Durch die veränderte Hutzengeometrie ist diese Forderung nicht mehr erfüllt.

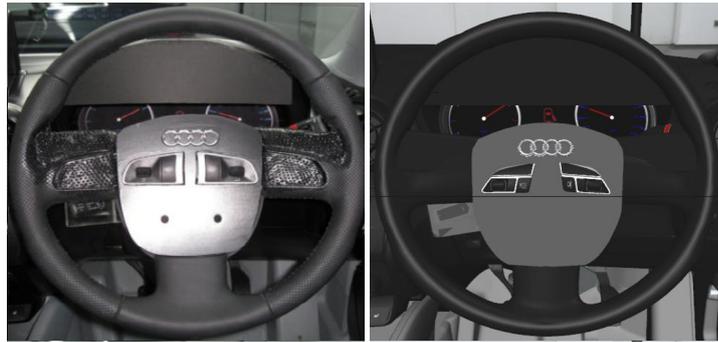


Abb. 3.10: Installierte Gestaltungsmängel am Lenkrad. Auffindbarkeit: Verdeckung des Kombidisplays und des Blinkerhebels. Erreichbarkeit: Erreichbarkeit der Drehsteller auf dem Lenkrad mit dem Daumen bei Umfassung des Lenkradkranzes. Reales Modell (links) und virtuelles Fahrerplatzmodell (rechts)

Ein Beispiel für einen Gestaltungsmangel hinsichtlich der Erreichbarkeit eines Untersuchungsobjekts ist ebenfalls in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Erreichbarkeit ist abhängig von der Reichweite nach vorn (DIN 33402-2, 2006) bzw. der Handreichweite des Fahrers (DIN ISO 3958, 1978). Der Greifraum bzw. die Greifbereiche sind symmetrisch angeordnet. Weiterhin spielt die Länge der Finger und Daumen eine Rolle bei der Bedienung der am und um das Lenkrad befindlichen Elemente wie den Lenkstockhebeln oder den Lenkraddrehstellern. Ein Gestaltungsmangel wird so ausgelegt, dass das betreffende Element nicht innerhalb der Handreichweite des Fahrers liegt. In der virtuellen Umgebung erhalten die Probanden nur bei Berühren des real vorhandenen Lenkradkranzes eine haptische Rückmeldung. Alle anderen Elemente werden visuell durch Durchdringung der virtuellen Flächen mit der virtuellen Körperrepräsentation hinsichtlich der Erreichbarkeit beurteilt. Somit wird festgestellt, ob dieses visuelle Feedback ausreichend ist, oder ob es ratsam ist, den Nutzer des virtuellen Fahrerplatzmodells durch einen weiteren Ausbau der haptischen Rückmeldung bzw. Simulation zu unterstützen.

Gestaltungsmängel aus dem Gebiet der Bedienbarkeit der Untersuchungsobjekte des Fahrerplatzes sind wie folgt aufgebaut. Die Bedienbarkeit wird unabhängig von der Erreichbarkeit der Elemente untersucht. Die Probanden können sich uneingeschränkt bis zu dem gefragten Element hin bewegen und dieses auf dessen lokale Ergonomie, d.h. Geometrie, Form und Größe untersuchen. Diese Parameter beeinflussen entscheidend die Bedienbarkeit. Exemplarisch kann an dieser Stelle folgender Gestaltungsmängel an-

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

geführt werden: Die Höhe eines Drehstellers ist zu gering ausgeführt, als dass man ihn greifen und drehen könnte. Mit DIN 894-3 (2000) sind Mindestmaße für Stellteile definiert, die eine problemlose Bedienbarkeit gewährleisten. Im vorliegenden Beispiel wird die Höhe des Drehstellers im Sinne eines Gestaltungsmangels auf 3mm reduziert, dabei wird zu Grunde gelegt, dass die Bedienung des Drehstellers als Zufassungsgriff mit Finger und Daumen ausgeführt wird.

Ein weiteres Beispiel für einen Gestaltungsmangel der Bedienbarkeit ist die Einschränkung der Eingriffstiefe, sodass ein Element nicht umfasst werden kann (vgl. Abbildung 3.11). Ausschlaggebend für die Auslegung dieses Gestaltungsmangels ist die minimale Handdicke eines Erwachsenen. Diese ist in DIN 33402-2 (2006) mit 20mm angegeben. Im Versuchsaufbau liegt die Handbremse auf der Mittelkonsole auf.



Abb. 3.11: Installierte Gestaltungsmängel an der Handbremse. Bedienbarkeit: Umfassen des Griffs nicht möglich. Reales Modell (links) und virtuelles Fahrerplatzmodell (rechts)

Jeder Proband beantwortet den vollständigen Fragebogen auf Basis der Signalentdeckungstheorie. Aus den erarbeiteten Fragen ergibt sich ein Fragenkatalog. Dieser wird geteilt, sodass jeder Proband einen Teil der Fragen im realen Fahrzeug, den anderen Teil im virtuellen Fahrzeug beantwortet. Um Trainingseffekte auszuschließen werden vier verschiedene Arten des Versuchsdurchlaufs generiert, auf welche die Versuchsteilnehmer nach dem Zufallsprinzip verteilt werden. Die verschiedenen Arten des Versuchsdurchlaufs unterscheiden sich hinsichtlich der Reihenfolge bei der Bearbeitung des Fragebogens (Beginn mit Teil 1 oder Teil 2) und im Bezug auf die Reihenfolge des zuerst untersuchten Modells (Beginn mit virtuellem Fahrerplatzmodell oder realen Fahrzeugmodell). Die Probanden beantworten jede Frage nur einmal, entweder in der virtuellen Umgebung oder im realen Modell. Im virtuellen Modell werden den Probanden die Funktionsweisen von HMD und Fingertracking erläutert, während die Ausrüstung angelegt wird. Das virtuelle Handmodell wird entsprechend der individuellen Handgeometrie der Versuchsteilnehmer skaliert. Es folgt eine Kalibrierung der Handkinematik des Handmodells. Parallel zur Beantwortung der Fragen wird die Dauer für das Treffen der Entscheidungen erfasst. Die Probanden werden davon in Kenntnis gesetzt, dass die Zeit gemessen wird. Im Versuch werden für beide Modelle die Anzahl der Treffer, Verpasser, korrekten Zurückweisungen und falschen Alarme ermittelt. Das grundsätzliche Vorgehen während des Versuchs sieht folgendermaßen aus:

- Einführend wird den Probanden das virtuelle und variable Fahrerplatzmodell er-

läutert und das Potential virtueller Methoden für den Entwicklungsprozess skizziert. Den Probanden wird der Versuchsansatz erklärt.

- Die Versuchsteilnehmer beantworten die untersuchten Fragestellungen im ersten Modell. Lenkrad und Sitz sind in beiden Modellen fest eingestellt und werden nicht individuell verändert. Nach dem Einstieg erfolgt eine Orientierungsphase im Modell. Zu Beginn jedes Themengebietes, z.B. Auffindbarkeit, erfolgt dessen exakte Definition. Die Antworten der Versuchspersonen werden von einem Versuchsleiter in einem Fragebogen erfasst und die benötigte Zeit für die Entscheidungsfindung dokumentiert.
- Die Versuchsteilnehmer beantworten die untersuchten Fragestellungen im zweiten Modell. Der Versuchsablauf erfolgt analog zum ersten Modell

Den Abschluss bildet der Fragebogen zu persönlichen Angaben und dem Immersionsempfinden. Der komplette Fragebogen ist in Anhang B.1 zu finden.

Das virtuelle Fahrerplatzmodell dient in erster Linie als Werkzeug für Experten auf dem Gebiet der ergonomischen Auslegung eines Fahrzeuginterieurs. Dies wurde auch bei der Auswahl des Probandenkollektivs für diese Studie berücksichtigt. Um dennoch die Allgemeingültigkeit der Untersuchung sicherzustellen wurde ein weiterer Teil der Probanden gezielt aus nicht technischen Bereichen rekrutiert. Insgesamt umfasst die Stichprobe 46 Personen.

#### 3.2.4 Versuchsergebnisse

Als Ergebnisse des Versuchs werden die jeweilige Anzahl der Treffer, Verpasser, korrekten Zurückweisungen und falschen Alarme über die Bewertungskriterien und Versuchspersonen gemittelt und als Anhaltswert für die Eignung des jeweiligen Untersuchungsobjekts bezüglich des Bewertungskriteriums angenommen. Als Verfahren zur Hypothesenprüfung wird die parameterfreie Prüfmethode Chi<sup>2</sup>-Test verwendet (Heller u. a., 1974). Das Signifikanzniveau wird auf 5% festgelegt. Grundsätzliches Ziel der Studie ist es die Eignung des virtuellen Fahrerplatzmodells zur Beurteilung ergonomischer Fragestellungen zu untersuchen. Daraus ergibt sich die folgende **(Haupt-)Nullhypothese  $H_{0,H}$**

*Ergonomische Bewertungskriterien, wie die Auffindbarkeit, Erreichbarkeit oder Bedienbarkeit von Anzeige- und Bedienelementen lassen sich im virtuellen Fahrerplatzmodell ebenso zuverlässig beurteilen wie in einem realen Modell.*

Dementsprechend lautet die **Alternativhypothese  $H_{1,H}$**  :

*Für die Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien, wie die Auffindbarkeit, Erreichbarkeit oder Bedienbarkeit von Anzeige- und Bedienelementen ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen virtuellem Fahrerplatzmodell und realem Modell.*

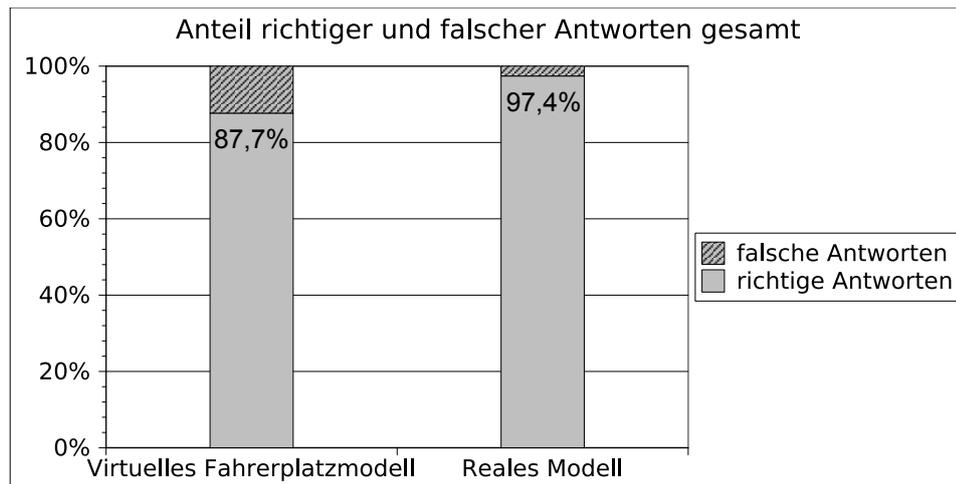


Abb. 3.12: Anteil richtiger und falscher Antworten

Die Analyse der Häufigkeiten richtiger und falscher Antworten in Abhängigkeit der Versuchsumgebung über alle Untersuchungsobjekte und alle ergonomischen Bewertungskriterien zeigt Unterschiede zwischen virtuellem Fahrerplatzmodell und dem realen Modell (siehe Abbildung 3.12).

Im virtuellen Fahrerplatzmodell werden insgesamt 87,7% aller Fragestellungen richtig beantwortet, im realen Modell werden hingegen 97,4% richtig beantwortet. Die statistische Analyse dieser Ergebnisse mittels Chi<sup>2</sup>-Test ergibt hierfür einen signifikanten Unterschied ( $p < .01$ ). Somit muss die Nullhypothese  $H_{0,H}$  zu Gunsten der Alternativhypothese  $H_{1,H}$  verworfen werden. Prüft man ausschließlich diese Auswertung, so liegt der Schluss nahe, dass die Ergebnisse des virtuellen Fahrerplatzmodells nicht auf Realfahrzeuge übertragbar sind. Da signifikante Unterschiede zwischen beiden Modellen vorliegen, wäre das virtuelle Fahrerplatzmodell ohne haptisches Feedback nicht für ergonomische Untersuchungen geeignet. Im Folgenden soll untersucht werden, ob dieses Fazit auf alle Fragestellungen zutrifft und warum diese Unterschiede zu Stande kommen.

Die ergonomischen Bewertungskriterien (vgl. Abbildung 3.8) unterscheiden sich in ihrer Komplexität. Nach Volpert (1990) sind unter anderem die Möglichkeit zur „körperlichen Aktivität“ sowie der Einsatz „vielfältiger Sinnesqualitäten“ ausschlaggebend für die Bewertung einer Arbeitsaufgabe. Folglich kann das Bewertungskriterium Bedienbarkeit als komplexer als die Erreichbarkeit eines Elements und diese wiederum komplexer als die Auffindbarkeit eingeordnet werden (vgl. Abbildung 3.13).



Abb. 3.13: Komplexitätsgrad der ergonomischen Bewertungskriterien

### 3.2 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien

Entsprechend dieser Einordnung der untersuchten Bewertungskriterien nach ihrem Komplexitätsgrad läßt sich folgende **Nullhypothese**  $H_{0,Bewertungskriterien}$  postulieren:

*Die Fehlerrate bei der Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien im virtuellen Fahrerplatzmodell ist unabhängig vom Komplexitätsgrad der Bewertungskriterien.*

Daraus läßt sich folgende **Alternativhypothese**  $H_{1,Bewertungskriterien}$  formulieren:

*Bei der Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien geringerer Komplexität ist die Fehlerrate im virtuellen Fahrerplatzmodell geringer als bei komplexeren Bewertungskriterien.*

Zur Untersuchung dieser Hypothese müssen die Ergebnisse zu den einzelnen Bewertungskriterien detailliert betrachtet werden. Zunächst wird das ergonomische Bewertungskriterium Auffindbarkeit näher betrachtet. Zur Feststellung, ob Fragen der Auffindbarkeit im virtuellen Fahrerplatzmodell untersucht werden können, werden Hypothesen formuliert, die anschließend statistisch validiert werden. Als **Nullhypothese**  $H_{0,A}$  wird postuliert:

*Die Fehlerrate bei der Bewertung der Auffindbarkeit von Elementen des Fahrerarbeitsplatzes ist unabhängig vom Untersuchungsmedium, zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und dem realen Modell sind keine Unterschiede feststellbar.*

Dementsprechend lautet die **Alternativhypothese**  $H_{1,A}$  :

*Es treten signifikante Unterschiede bei der Fehlerrate der Bewertung von Auffindbarkeiten bezüglich der Elemente des Fahrerarbeitsplatzes zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und dem realen Modell auf.*

Zur Untersuchung dieser Hypothesen erfolgt zunächst eine Analyse der Häufigkeiten richtiger und falscher Antworten der zugehörigen Untersuchungsobjekte. Aus Abbildung 3.14 wird deutlich, dass richtige und falsche Antworten mit exakt gleichen Häufigkeiten in beiden Versuchsumgebungen vorkommen. Bei jeweils 99,0% der Untersuchungsobjekte im Versuch erfolgt eine korrekte Bewertung durch die Probanden. Es lassen sich keine signifikanten Häufigkeitsunterschiede feststellen.

Die Betrachtung getrennt nach Fällen mit und ohne Gestaltungsmangel zeigt, dass die Fehlerraten bei Untersuchungsobjekten mit Gestaltungsmangel sich bei etwa 1,5% bis 2% bewegen. Sind keine installierten Mängel vorhanden, treten im virtuellen Fahrerplatzmodell nur bei 0,5% der Untersuchungsobjekte Fehler auf, wohingegen von den Probanden im realen Modell kein Fehler gemacht werden (vgl. Abbildung 3.15).

Die statistische Untersuchung mittels Chi<sup>2</sup>-Test ergibt auch für die Fehlerraten aufgliedert nach den Antwortmöglichkeiten der Signalentdeckungstheorie keine signifikanten Unterschiede ( $p > .60$ ). Analog zur Argumentation in Kapitel 3.1.4 wird damit die Nullhypothese  $H_{0,A}$  angenommen. Probanden, die bereits mehr Erfahrungen mit VR-Systemen aufweisen konnten, sind etwas sicherer in ihrer Entscheidungsfindung und

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

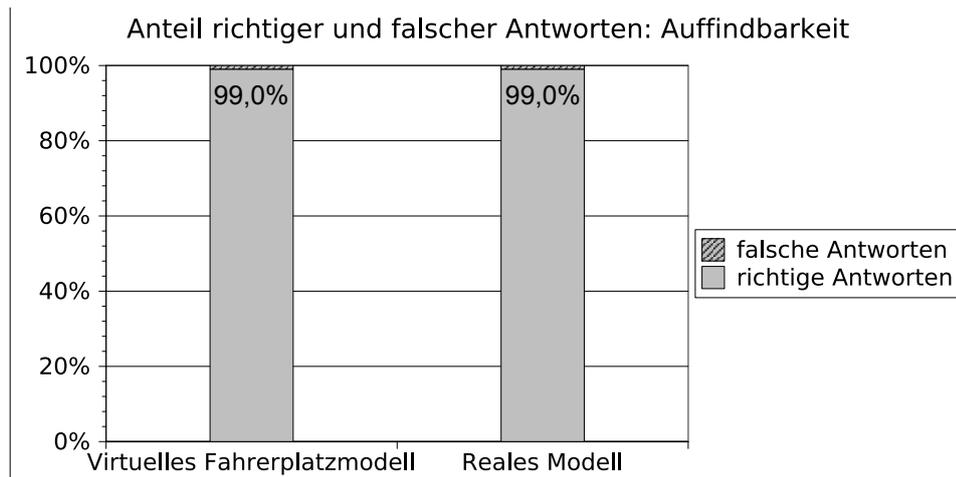


Abb. 3.14: Anteil richtiger und falscher Antworten beim Bewertungskriterium Auffindbarkeit

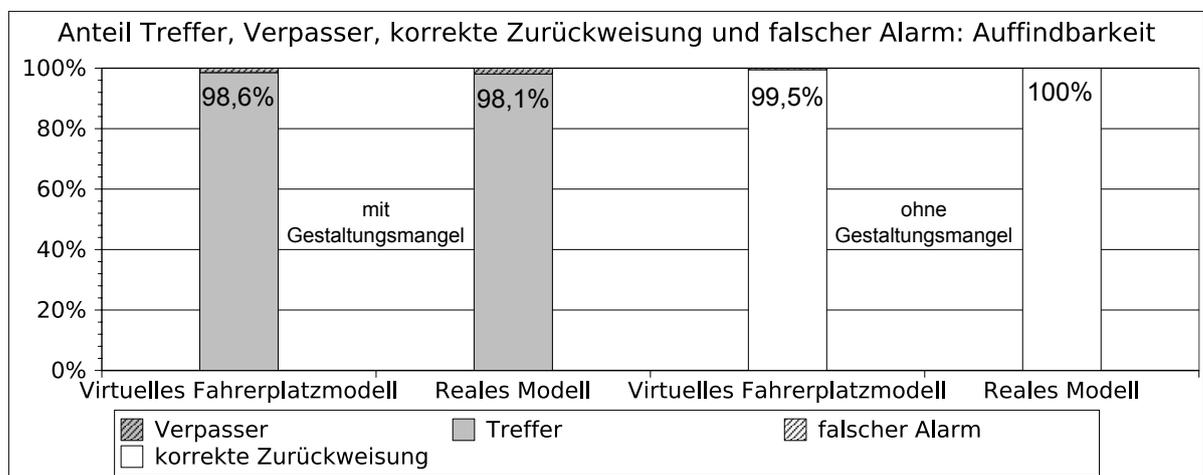


Abb. 3.15: Anteil Treffer, Verpasser, korrekte Zurückweisung und falscher Alarm beim Bewertungskriterium Auffindbarkeit

geben weniger falsche Antworten. Auf Grund der geringen gesamten Fehlerzahl in der Rubrik Auffindbarkeit muss dieses Ergebnis jedoch durch die Betrachtung der anderen Themengebiete bestätigt oder widerlegt werden, bevor zuverlässige Aussagen getroffen werden können.

Analog zur Analyse der Untersuchungsergebnisse zur Auffindbarkeit wird auch für das ergonomischen Bewertungskriterium Erreichbarkeit zunächst die Hypothese postuliert, die nachfolgend statistisch untersucht und bewertet wird. Die **Nullhypothese**  $H_{0,E}$  zur Erreichbarkeit lautet folgendermaßen:

*Die Fehlerrate bei der Bewertung der Erreichbarkeit von Elementen des Fahrerarbeitsplatzes ist unabhängig vom Untersuchungsmedium, zwischen dem*

virtuellen Fahrerplatzmodell und dem realen Modell sind keine Unterschiede feststellbar.

Daraus läßt sich folgende **Alternativhypothese**  $H_{1,E}$  formulieren:

*Es treten signifikante Unterschiede bei der Fehlerrate der Bewertung von Erreichbarkeiten bezüglich der Elemente des Fahrerarbeitsplatzes zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und dem realen Modell auf.*

Abbildung 3.16 zeigt den Vergleich der Häufigkeitsverteilungen richtiger und falscher Antworten zu den Fragen der Erreichbarkeit. Im virtuellen Fahrerplatzmodell werden 91,1% der Fragestellungen richtig beantwortet, wohingegen im realen Modell die Probanden bei 98,8% der Untersuchungsobjekte die richtige Antwort geben. Diese Unterschiede sind nach der Auswertung mittels  $\chi^2$ -Test als signifikant einzustufen ( $p < .01$ ). Damit muss die Nullhypothese  $H_{0,E}$  zugunsten der Alternativhypothese  $H_{1,E}$  verworfen werden.

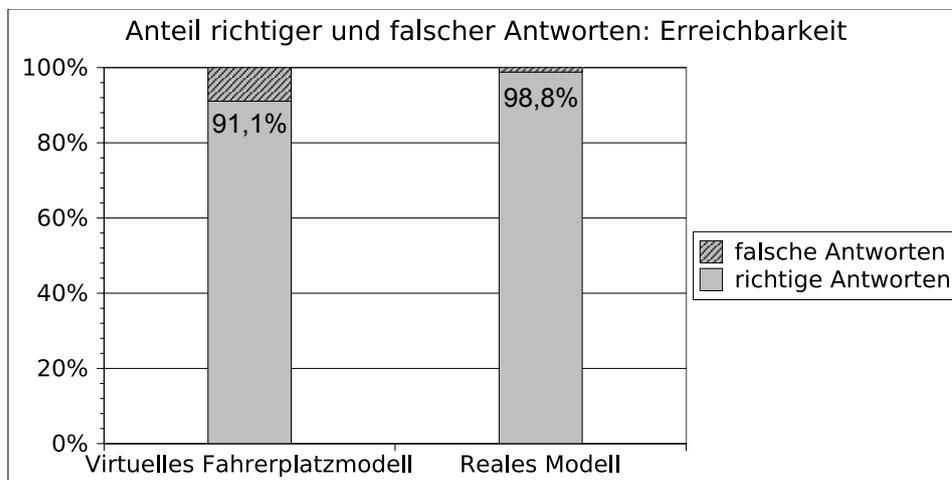


Abb. 3.16: Anteil richtiger und falscher Antworten beim Bewertungskriterium Erreichbarkeit

Darum gilt es im nächsten Schritt zur Auswertung des ergonomischen Bewertungskriteriums Erreichbarkeit die Fehlerraten bezüglich der Antwortkategorien der Signalentdeckungstheorie zu analysieren. Hierbei fällt auf, dass die Probanden bei Untersuchungsobjekten ohne Gestaltungsmangel nur bei 0,5% (im realen Modell) bzw. 1,9% (im virtuellen Fahrerplatzmodell) der Untersuchungsobjekte die Fragestellung nicht korrekt zurückweisen. Obwohl sehr gering ausgeprägt, ist dieser Häufigkeitsunterschied statistisch signifikant ( $p < .01$ ). Bei Untersuchungsobjekten mit installiertem Gestaltungsmangel wird im virtuellen Fahrerplatzmodell nur eine Trefferquote von 84,1% erzielt. Verglichen mit einer Trefferquote im realen Modell von 98,1%, lassen sich hier deutliche Unterschiede erkennen, diese sind auch als statistisch signifikant einzustufen ( $p < .01$ ). Den dargestellten Zusammenhang, zeigt anschaulich Abbildung 3.17.

Es lässt sich hier ein liberales Antwortverhalten der Probanden erkennen. Das bedeutet die Probanden tendieren mehr dazu zu antworten, dass ein Element erreicht wird als dass

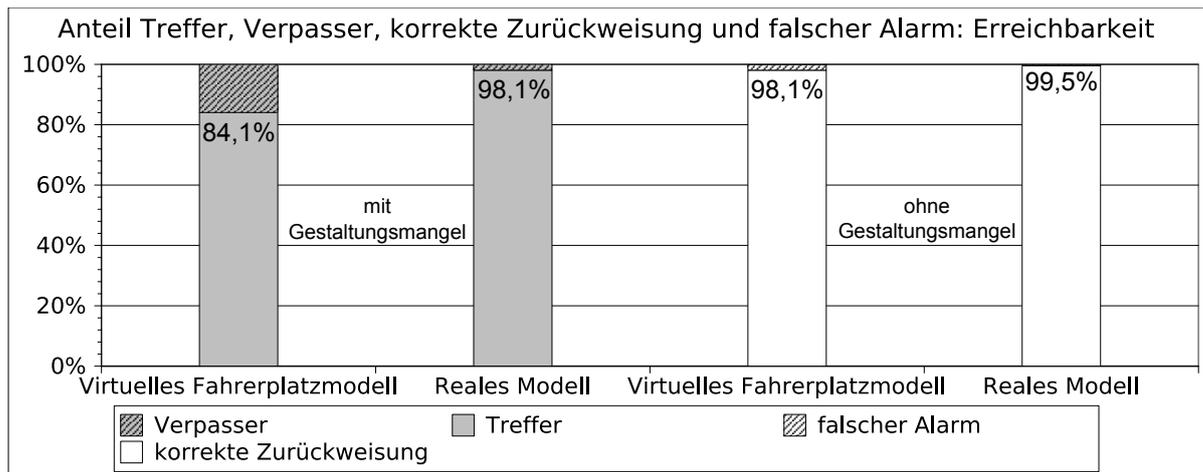


Abb. 3.17: Anteil Treffer, Verpasser, korrekte Zurückweisung und falscher Alarm beim Bewertungskriterium Erreichbarkeit

dies nicht möglich wäre. Somit kommt es, bei vorhandenem Gestaltungsmangel, zu einem Verpasser und damit zu einer falschen Entscheidung.

An dieser Stelle soll nochmals detaillierter untersucht werden, aus welchen Gründen Fehlentscheidungen getroffen werden. Es zeigt sich, dass vor allem bei den Untersuchungsobjekten Erreichbarkeit des Handschuhkastenöffners, des Lautstärkereglers, des Blinkerhebels und der elektrischen Sitzverstellung Unterschiede in der Bewertung zwischen realem Modell und virtuellem Fahrerplatzmodell auftreten. Leichte Abweichungen sind auch bei dem Untersuchungsobjekt Außenspiegelverstellung zu erkennen. Bei den genannten weiter zu untersuchenden Untersuchungsobjekten lassen sich keine Gemeinsamkeiten auf Grund des Stellteiltyps ableiten. Es fällt allerdings auf, das Handschuhkastenöffner und Lautstärkeregler und mit Einschränkungen auch der Außenspiegelversteller im äußeren Bereich des Greifraumes des Fahrers und am Rande des durch das HMD eingeschränkten Sichtfeldes des Probanden liegen (vgl. Abbildung 3.18). Der stereoskopische Effekt des HMD ist nur in einem Bereich in der Mitte des Bildes optimal. An den Rändern des Bildes reduziert sich der tiefenwirksame Eindruck und es kann zu Doppelbildern kommen.

Die elektrische Sitzverstellung ist seitlich am Fahrersitz angebracht. Der hier installierte Gestaltungsmangel besteht darin, dass der Durchgang zwischen Sitzverstellung und Verkleidung zu gering ausgeführt ist<sup>10</sup>. Im realen Modell wird den Probanden durch die Kollision mit der Verkleidung die Enge bewusst. Im virtuellen Modell ist diese haptische Rückmeldung nur visuell dargestellt. Die Kollision mit dem Handrücken kann aber nicht visuell wahrgenommen werden, da die Hand des Probanden die Durchdringung mit der Verkleidung verdeckt. Auch im realen Fahrzeug ist diese Kollision nicht sichtbar, aber spürbar. Eine mögliche Fehlerquelle ist somit das fehlende haptische Feedback in der virtuellen Umgebung oder eine andere Art der Kollisionserkennung in Kombination mit

<sup>10</sup>Entscheidend hierfür ist das Maß für die minimale Handdicke von  $d=20\text{mm}$ , nach DIN 33402-2 (2006)

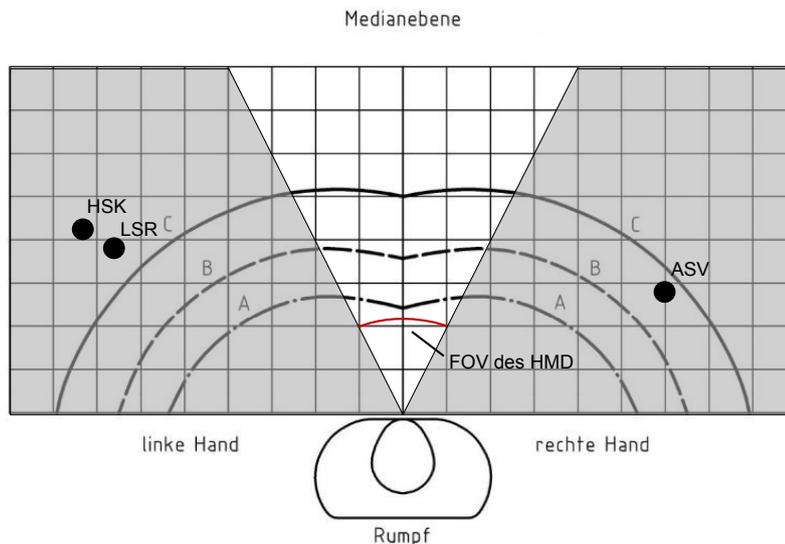


Abb. 3.18: Position der Stellteile Handschuhkastenöffner (HSK), Lautstärkeregler (LSR) und Außenspiegelverstellung (ASV) im Bezug auf die Greifbereiche des Probanden und dessen durch das HMD eingeschränkte Sichtfeld

Verdeckungen. Dieser Fall tritt ebenfalls bei der Außenspiegelverstellung ein. Auch hier kann die Enge zwischen Stofffeld der Tür und Türzuziehgriff nur bedingt wahrgenommen werden.

Als weiteres Element mit erhöhter Fehlerrate im virtuellen Fahrerplatzmodell hinsichtlich der Erreichbarkeit ist der Blinkerhebel zu nennen. Als mögliche Fehlerursachen sind auch hier das fehlende haptische Feedback und das durch das HMD eingeschränkte Sichtfeld zu nennen. Der Blinkerhebel befindet sich hinter dem Lenkrad. Um die gestellte Aufgabe zu erfüllen, müssen die Probanden seitlich hinter das Lenkrad blicken, wobei ihre Hand dabei das zu untersuchende Stellteil verdeckt.

Zwischen weiblichen und männlichen Probanden lassen sich keine Unterschiede feststellen. Allerdings konnte festgestellt werden, dass Probanden mit technischem Hintergrund oder einer ausgeprägten Erfahrung bezüglich CAD oder VR-Systemen im Vergleich zum übrigen Probandenkollektiv geringere Fehlerraten beim ergonomischen Bewertungskriterium Erreichbarkeit in der vorliegenden Studie erreichen. Untersuchungen zur Erreichbarkeit sind nach diesen Betrachtungen scheinbar unabhängig von der Art des zu untersuchenden Elements. Entscheidend sind dessen Anordnung, Verdeckungen und die Wahrnehmung von Kollisionen. Rückschlüsse auf andere Elemente können somit hinsichtlich deren Position und Anordnung getroffen werden.

Im Folgenden sollen die Untersuchungsergebnisse zum ergonomischen Bewertungskriterium Bedienbarkeit analysiert werden. Wie bereits beschrieben handelt sich dabei um die detaillierte Beurteilung eines Elements hinsichtlich dessen Form, Größe und Geometrie. Die Bedienbarkeit wird unabhängig von der Erreichbarkeit des Elements untersucht.

Die **Nullhypothese**  $H_{0,B}$  zur Bedienbarkeit lautet folgendermaßen:

*Die Fehlerrate bei der Bewertung der Bedienbarkeit von Elementen des*

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

*Fahrerarbeitsplatzes ist unabhängig vom Untersuchungsmedium, zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und dem realen Modell sind keine Unterschiede feststellbar.*

Daraus läßt sich folgende **Alternativhypothese  $H_{1,B}$**  formulieren:

*Es treten signifikante Unterschiede bei der Fehlerrate der Bewertung von Bedienbarkeiten bezüglich der Elemente des Fahrerarbeitsplatzes zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und dem realen Modell auf.*

Zunächst wird wiederum das Verhältnis richtiger und falscher Antworten bei den Untersuchungsobjekten zur Erreichbarkeit untersucht (vgl. Abbildung 3.19). Im realen Modell werden 97,3% der Fragestellungen richtig beantwortet im virtuellen Fahrerplatzmodell sind es hingegen nur 70,3%. Diese Unterschiede sind signifikant ( $p < .01$ ), damit wird die Alternativhypothese  $H_{1,B}$  bestätigt.

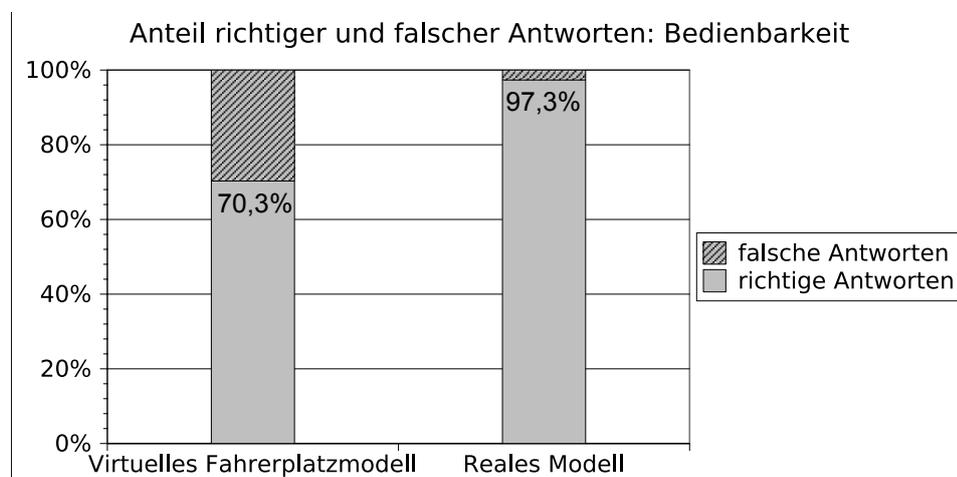


Abb. 3.19: Anteil richtiger und falscher Antworten beim Bewertungskriterium Bedienbarkeit

Es zeigt sich, dass analog zu den vorherigen Betrachtungen Fehlentscheidungen im virtuellen Fahrerplatzmodell vor allem bei Untersuchungsobjekten mit installiertem Gestaltungsmangel auftreten (vgl. Abbildung 3.20).

Die Trefferquote beträgt im virtuellen Fahrerplatzmodell 52,6% im Gegensatz zu einer Trefferhäufigkeit von 95,2% im realen Modell ( $p < .01$ ). Im realen Modell kommt es bei keiner Fragestellung zu einem falschen Alarm, im virtuellen Fahrerplatzmodell wird bei 7,6% der Untersuchungsobjekte die Situation als schlecht bedienbar beurteilt, obwohl dies nicht der Fall ist. Eine Analyse der einzelnen Fragestellungen soll Auskunft darüber geben, wo die Gründe für die Unterschiede zwischen realem und virtuellem Fahrerplatzmodell liegen und warum es zu Fehlentscheidungen kommt. Die betroffenen Untersuchungsobjekte umfassen die Stellteile Handschuhkastenöffner, Außenspiegelverstellung, Handbremse, elektrische Fensterheber, Lichtdrehshalter, Dreh-Drück-Steller und der Becheraufnahme (Cupholder).

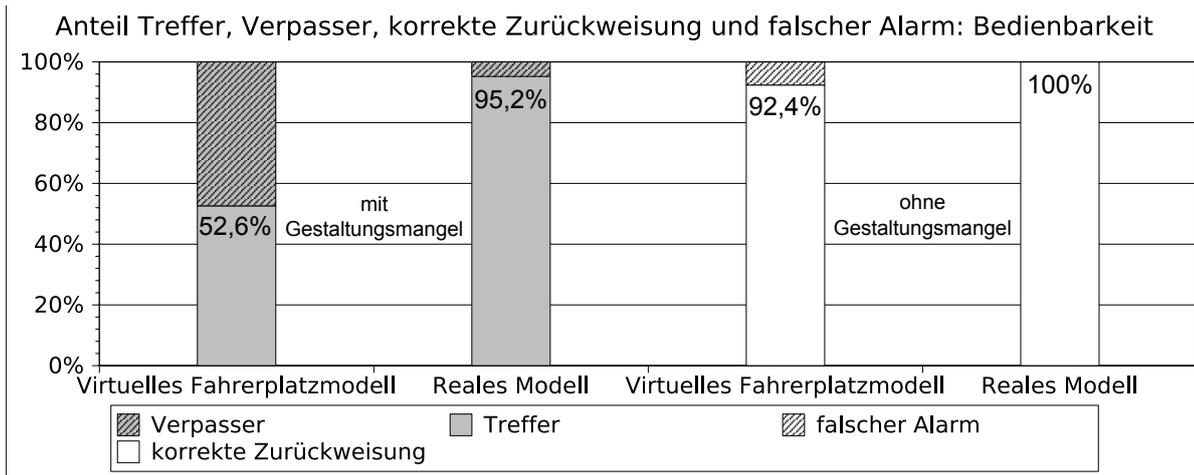


Abb. 3.20: Anteil Treffer, Verpasser, korrekte Zurückweisung und falscher Alarm beim Bewertungskriterium Bedienbarkeit

Als Gestaltungsmangel wird für den Handschuhkastenöffner die Eingrifftiefe reduziert, sodass man den Hebel des Öffners nicht fassen kann. Ein ähnlicher Gestaltungsmangel wird bei Dreh-Drück-Steller und Lichtdrehschalter installiert: hier werden die Höhen des Knopfes bzw. Knebels so reduziert, dass man sie nur schwer fassen und bedienen kann. Diese Gestaltungsmängel werden nicht von jedem Probanden wahrgenommen. Es lassen sich Unterschiede hinsichtlich der Erfahrungen mit CAD- und VR-Anwendungen feststellen. Diesen Probandengruppen fällt es leichter, einzuschätzen, ob die Dimensionen eines Stellteils ausreichend sind, um dieses zu manipulieren. Es ist anzunehmen, dass das räumliche Vorstellungsvermögen bei dieser Probandengruppe in der virtuellen Umgebung stärker ausgeprägt ist.

Im Fall von Außenspiegelverstellung, elektrischem Fensterheber und Handbremse treten die gleichen Probleme wie zuvor bei Sitzverstellung und Außenspiegelverstellung hinsichtlich der Erreichbarkeit auf. Durch Verdeckungen können Kollisionen der Hand bzw. der Finger mit Objekten der virtuellen Szene nicht erkannt werden. Es fehlt eine haptische Rückmeldung bzw. eine Kollisionserkennung. Der Durchgang zwischen Stofffeld der Tür und Türzuziehgriff ist für die Hand zu eng, als das noch eine Drehbewegung mit der Außenspiegelverstellung ausgeführt werden kann. Der Handrücken schneidet das Stofffeld, während der Daumen mit dem Türzuziehgriff kollidiert. Die Kollision mit dem Stofffeld wird durch die Hand verdeckt, während die Kollision mit dem Türzuziehgriff durch eine Verdeckung des Türzuziehgriffs selbst nicht einsehbar ist. Kollidiert der Finger mit den Rändern der elektrischen Fensterheber ist auch das nicht eindeutig visuell erkennbar. Die Kollision wird durch den Finger selbst verdeckt. Die Handbremse liegt auf der Mittelkonsole auf. Dadurch ist es nicht möglich, die Handbremse in unterster Stellung mit der Hand komplett zu umfassen. Die Kollision mit der Mittelkonsole erfolgt mit dem Handrücken und den Fingern. Sie wird durch die Hand des Probanden verdeckt.

Im virtuellen Fahrerplatzmodell behindern mitunter die Datenhandschuhe zur Übertragung der Fingerbewegung in die Simulation eine konkrete Beurteilung. Die Finger-

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

skalierung muss möglichst exakt eingestellt werden. Bisher wird die gesamte Hand auf Basis der Handlänge der Probanden skaliert. Die Datenhandschuhe imitieren die Fingerbewegung durch integrierte Dehnmessstreifen. Dadurch kann die Bewegung jedes Fingerglieds durch das virtuelle Modell nachgeahmt werden. Diese Imitation entspricht der realen Bewegung nur näherungsweise (vgl. Abbildung 3.21). Demnach kann es auch hier zu Bewertungsungenauigkeiten kommen.



Abb. 3.21: Abweichung verschiedener Handhaltungen zwischen realer Hand und virtuellem Modell

Auch bei der Entnahme des Bechers aus dem Cupholder treten Unterschiede auf. Im virtuellen Fahrerplatzmodell wird dessen Position mittels Trackingsystem in Echtzeit bewegt. Die Probanden können den Becher greifen und bewegen. Während der Becher in der virtuellen Umgebung im Becherhalter platziert wird, steht er im variablen Fahrerplatzmodell auf einer Plattform deren Position der des virtuellen Becherhalter entspricht. Im realen Fahrerplatzmodell ist ein dagegen ein realer Becherhalter vorhanden. Für den Becherhalter ist ein Gestaltungsmangel installiert: Die Entnahmesituation ist zusätzlich eingengt, somit ist es nur sehr schwer möglich den Becher problemlos aus dem Halter zu entnehmen. Im realen Modell wird die Entnahme spürbar durch Kollisionen erschwert. Durch das fehlende Feedback im virtuellen Fahrerplatzmodell entfällt diese Wahrnehmung. Weiterhin werden die Kollisionen durch den Becher und die Schaltung verdeckt.

Bei den Untersuchungsobjekten zum ergonomischen Bewertungskriterium Bedienbarkeit erhalten die Probanden kein haptisches Feedback von der virtuellen Umgebung zu Kollisionen. Unter diesen Umständen ist die Vergleichbarkeit von realem und virtuellem Fahrerplatzmodell eingeschränkt.

Die dargestellten Ergebnisse bestätigen die Alternativhypothese  $H_{1,Bewertungskriterien}$ . Bei den Untersuchungsobjekten höherer Komplexität treten bei der Bewertung mehr Fehler auf. Sowohl bei der Häufigkeit richtiger Antworten als auch bei der Häufigkeit für Treffer, gemäß den Antwortkategorien der Signalentdeckungstheorie, treten zwischen den ergonomischen Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit signifikante Unterschiede auf ( $p < .01$ ).

Die vorliegende Untersuchung umfasst neben der Erfassung der Antworten der Probanden auch eine Zeitmessung. Die Zeitdaten werden sowohl im virtuellen wie auch realen Fahrerplatzmodell erfasst. Es wird gemessen, welche Zeit die Probanden vom Stellen der Frage bis zum Geben der Antwort benötigen. Es zeigt sich, dass die Probanden im Mittel im virtuellen Fahrerplatzmodell deutlich mehr Zeit für die Beantwortung der Fragestellungen benötigen, dies trifft für alle Antwortmöglichkeiten gemäß der Signalentdeckungstheorie zu (vgl. Abbildung 3.22).

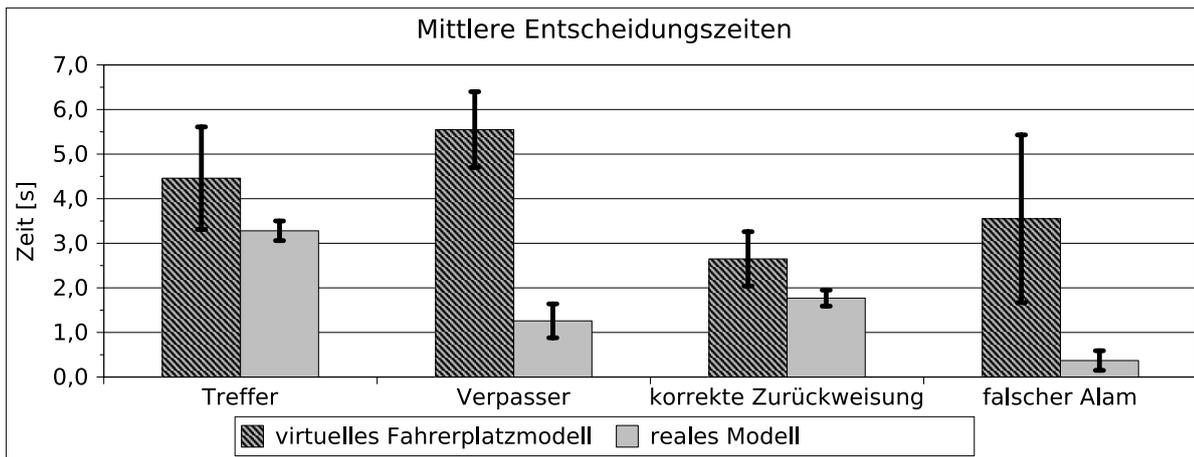


Abb. 3.22: Mittelwert der Entscheidungszeit mit Standardabweichung entsprechend den Antwortkategorien der Signalentdeckungstheorie

Signifikante Unterschiede bei den Entscheidungszeiten treten vor allem bei Fragestellungen zu den ergonomischen Bewertungskriterien Erreichbarkeit und Bedienbarkeit auf.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

In der dargestellten Untersuchung werden ergonomische Fragestellungen identifiziert, die im virtuellen Fahrerplatzmodell untersucht werden können. Nach Analyse der Ergebnisse lassen sich signifikante Unterschiede zwischen virtueller Umgebung und realem Modell feststellen. Für die Untersuchungsobjekte zur Auffindbarkeit treten zwischen virtuellem Fahrerplatzmodell und realem Modell keine statistisch nachweisbaren Unterschiede auf, diese lassen sich offenbar im virtuellen Fahrerplatzmodell unter den getroffenen Einschränkungen realistisch bewerten. Für Bewertungskriterien bei denen in Realität ein höherer Grad an haptischer Wahrnehmung eingesetzt wird, ergeben sich Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsmedien. Dies ist der Fall für die Bewertungskriterien Erreichbarkeit und Bedienbarkeit. Hier treten signifikante Unterschiede bei unterschiedlichen Fragestellungen auf, vor allem bei Untersuchungsobjekten mit Gestaltungsmangel. Als Hauptursache der Unterschiede wird die fehlende haptische Rückmeldung identifiziert. Während im Realfahrzeug Kollisionen spürbar wahrgenommen werden, fehlt diese Information im virtuellen Modell nahezu gänzlich. Nur Lenkrad und Sitz sind auch physisch vorhanden. Eine Beurteilung und Entscheidungsfindung ohne haptisches Feedback oder Kollisionserkennung liefert in diesen Fällen keine zuverlässigen Ergebnisse. Diese Schlussfolgerung bestätigt die Unterstützung des virtuellen Fahrerplatzmodells durch das variable Fahrerplatzmodell. In diesem sind wesentliche Elemente des Fahrerplatzes integriert. Dazu zählen unter anderem Schaltung, Mittelarmlehne, Türinnenbetätigung oder Fensterheber. In das Modell können auch neue Objekte, wie beispielsweise ein Becherhalter, integriert werden. Ein großer Vorteil des virtuellen Fahrerplatzmodells ist die Möglichkeit mehrere Varianten anzuzeigen. Dafür ist es nicht immer zielführend, die Objekte real in das variable Modell zu integrieren. Für diese Elemente und zur generel-

### *3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells*

len Optimierung der Versuchsumgebung empfiehlt sich eine Kollisionserkennung. In der virtuellen Umgebung ist es möglich, Körper die einander durchdringen, zum Zeitpunkt der Durchdringung einzufärben. Im Versuch hat sich herausgestellt, dass die Hand der Probanden eine angrenzende Fläche meist nur teilweise oder nur leicht durchdringt. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich die Überlegung eine gestaffelte Einfärbung der kollidierenden Körper entsprechend der Stärke der Durchdringung in die Simulation zu implementieren. Die Analyse der Zeitmessung ergibt Unterschiede in der Entscheidungszeit zwischen virtuellem Fahrerplatzmodell und realem Modell. Somit sind Untersuchungen zu Aktionszeiten im virtuellen Modell nur bedingt möglich.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass sich das virtuelle Fahrerplatzmodell für Fragen der Auffindbarkeit gut eignet. Für die Bewertungskriterien Erreichbarkeit und Bedienbarkeit ist ein haptische Rückmeldung bzw. eine Kollisionskontrolle notwendig. Die Kombination mit dem variablen Fahrerplatzmodell stellt hierbei eine Ergänzung dar, welche die bei der Untersuchung ergonomischer Fragestellungen aufgetretenen Mängel aus den Bereichen Erreichbarkeit und Bedienbarkeit ausgleichen kann. Nur so können die Ergebnisse des virtuellen Modells zuverlässig auf Realfahrzeuge übertragen werden. Beachtet werden sollte, dass man für Entscheidungen in der virtuellen Umgebung mehr Zeit benötigt.

## 3.3 Entnahmebewegungen in virtuellen und realen Umgebungen

Aufbauend auf die Ergebnisse zur Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien wird im folgenden Kapitel eine Studie beschrieben, mit deren Hilfe untersucht werden soll, ob ein Algorithmus zur Kollisionskontrolle Abhilfe für die aufgezeigten Schwächen der virtuellen Umgebung bieten kann. Dies bezieht sich insbesondere auf die im vorangehenden Kapitel beschriebene fehlende haptische Rückmeldung. Untersucht werden soll dieser Aspekt exemplarisch an dem Untersuchungsobjekt Bedienbarkeit des Becherhalters, dies entspricht der Entnahme eines Bechers aus dem Becherhalter im Fahrzeuginterieur. Bei der Bewertung dieses Untersuchungsobjekts in der Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien traten deutliche Unterschiede zwischen realem Modell und virtuellem Fahrerplatzmodell hervor. Aus diesem Grund wurde eine Methodik zur Kollisionskontrolle im virtuellen Fahrerplatzmodell entwickelt, die im anschließenden Abschnitt kurz vorgestellt werden soll.

### 3.3.1 Ableitung des Versuchskonzepts und Versuchsbeschreibung

Der für die Kollisionskontrolle eingesetzte Mechanismus basiert im Wesentlichen auf einer Kollisionserkennung mit einer Farbinterpolation abhängig vom Überschneidungsgrad der kollidierenden Objekte. In der virtuellen Umgebung können Körper die einander durchdringen, zum Zeitpunkt der Durchdringung eingefärbt werden. In der Studie zur Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien hat sich herausgestellt, dass die Hand der Probanden eine angrenzende Fläche meist nur teilweise oder nur leicht durchdringt. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich die Überlegung eine gestaffelte Einfärbung der kollidierenden Körper entsprechend der Stärke der Durchdringung in die virtuelle Umgebung zu implementieren. Die umgesetzte Farbinterpolation ist in Abbildung 3.23 dargestellt.



Abb. 3.23: Kollisionskontrolle: Farbinterpolation abhängig vom Überschneidungsgrad der kollidierenden Objekte

Es soll untersucht werden, ob es im virtuellen Fahrerplatzmodell mit Hilfe der beschriebenen Funktion zur Kollisionserkennung möglich ist, die Bedienung eines Cupholders in einem Fahrzeuginterieur zu untersuchen und ob die erhaltenen Ergebnisse auf ein entsprechendes Realfahrzeug übertragbar sind. Zur Untersuchung dieser Fragestellung sollen die Entnahmekurven im virtuellen Modell mit Entnahmekurven in einem realen Modell verglichen werden. Zu diesem Zweck wird ein realer Becherhalter in das variable Modell integriert und zusätzlich ein Teil der Schalttafel eines realen Fahrzeugs integriert. Damit entsteht ein reales Modell für die Entnahmesituation. Diese stellt sich folgendermaßen dar: In einem Becherhalter, der vor der Schaltung in der Mittelkonsole integriert

ist, befindet sich jeweils links und rechts von der Schaltung eine Becheraufnahme. Die beiden Becheraufnahmen unterscheiden sich zudem in ihrem Öffnungsdurchmesser und ihrer Tiefe. Die Entnahmekurve wird auf der einen Seite durch die Schalttafel begrenzt. Auf der anderen Seite befindet sich der Schaltknopf, um den die Probanden den Becher bei der Entnahme herum führen müssen. Im virtuellen Fahrerplatzmodell ist die Situation äquivalent dargestellt, allerdings befindet sich anstelle der realen Schalttafel nur deren virtuelle Entsprechung im Versuchsaufbau. Der reale Becher wird getrackt und gleichzeitig seine virtuelle Entsprechung in der Simulation visualisiert. Die Kollisionkontrolle ist im virtuellen Modell für Becher und Schalttafel aktiviert. Kommt es zu einer Kollision zwischen Becher und Schalttafel wird die Farbe des Bechers gemäß dem in Abbildung 3.23 gezeigten Modell verändert. Abbildung 3.24 gibt schematisch einen Überblick des Versuchsaufbaus.

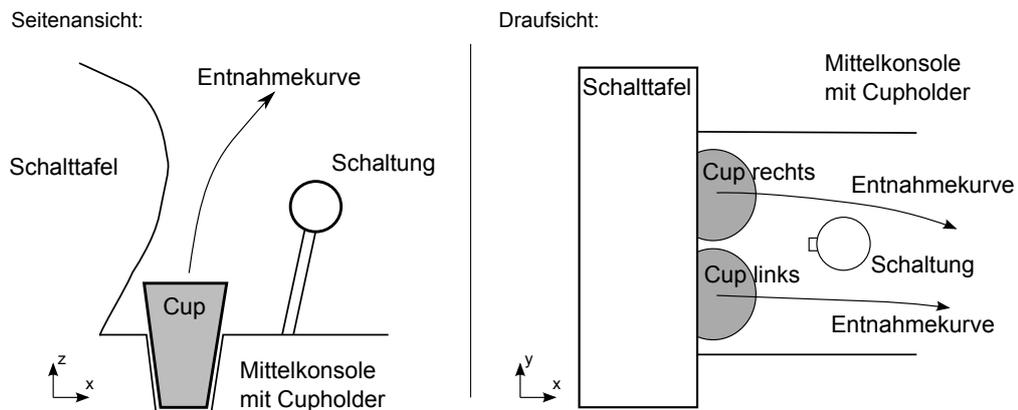


Abb. 3.24: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus: Entnahme eines Bechers aus dem linken und rechten Becherhalter

Die Probanden werden nun aufgefordert den Cup aus dem jeweiligen Becherhalter zu entnehmen und in Richtung Mund zu führen. Um die Entnahmebewegung so realistisch wie möglich zu gestalten, ist der Becher mit 0,4l Flüssigkeit gefüllt und mit einem Deckel verschlossen. Für die Entnahmebewegung werden den Probanden keine weiteren Einschränkungen gemacht. Am Versuch nahmen 13 Probanden teil, es wurden von jedem Probanden 10 Entnahmekurven aufgezeichnet. Den Probanden ist die Funktion zur Kollisionkontrolle im virtuellen Fahrerplatzmodell nicht bekannt.

An dieser Stelle soll kurz die Methodik zur Aufzeichnung der Entnahmekurven beschrieben werden. Der Becher ist mit einem Trackingtarget an der Oberseite versehen. Mittels Echtzeittracking werden die Positions- und Rotationsdaten des Bechers in die VR-Simulation übertragen und im virtuellen Fahrerplatzmodell visualisiert. Diese Positions- und Rotationsdaten werden aufgezeichnet und in einer Exportdatei abgespeichert. Die Analyse der Bewegungsbahnen erfolgt in der CAD-Software Catia V5 im Modul DMU Fittings<sup>11</sup>, dazu werden die exportierten Daten in ein vom Modul DMU Fittings impor-

<sup>11</sup>Catia V5 ist ein CAD-Programm der französischen Firma Dassault Systèmes, mit dem Modul DMU Fittings lassen sich in der CAD-Umgebung Einbauuntersuchungen durchführen

### 3.3 Entnahmebewegungen in virtuellen und realen Umgebungen

tierbares sogenanntes .xml Trackfile konvertiert. Anschließend stehen die Bewegungsbahnen der Becherentnahme in der CAD-Umgebung zur Verfügung. Abbildung 3.25 zeigt neben der eben beschriebenen Vorgehensweise auch den exemplarischen Verlauf einer Bewegungskurve im Modul DMU Fittings. Die Aufzeichnung der Entnahmekurven im realen Modell erfolgt analog, d.h. die VR Simulation läuft im Hintergrund wird den Probanden aber nicht dargestellt.

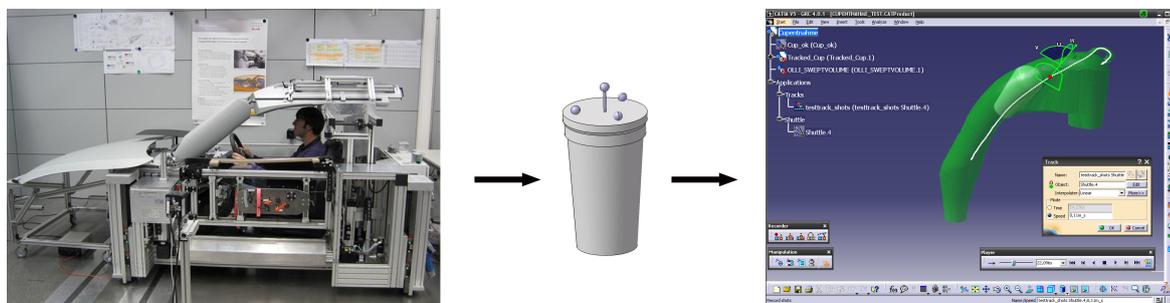


Abb. 3.25: Aufzeichnen der Entnahmekurven mittels Trackingsystem und Importieren der Kurven in Catia V5 DMU Fittings

Der Vergleich der Entnahmebewegungen zeigt, dass es bei den Probanden sowohl inter- als auch intrapersonal unterschiedliche Entnahmestrategien gibt. Dies wird insbesondere bei einem Vergleich der über die Entnahmebewegung des Bechers berechneten Hüllkurven deutlich. Die Hüllkurve (in Abbildung 3.25 grün dargestellt) beschreibt die vom Becher bei der Entnahme überstrichene Grenzfläche und berücksichtigt im Gegensatz zu einem reinen Bewegungspfad (in Abbildung 3.25 weiß dargestellt) auch die Rotation des Bechers um die Raumachsen. Bei der Entnahmebewegung ist ein „Ausfädeln“ des Bechers aus der Halterung um Schalttafel und Schaltknäuf nötig. Beim Vergleich der Entnahmebewegungen zeigen sich hier Unterschiede wann und um welche Raumachsen der Becher von den Probanden geschwenkt wird.

Auf Grund dieser Tatsache macht ein direkter Vergleich der Bewegungspfade nur eingeschränkt Sinn. Als ein deutlich besser geeigneter Kennwert für den Vergleich der Entnahmekurven stellt sich der minimale Abstand der durch die Bewegungsbahn erzeugten Hüllkurve zur Schalttafel dar. In der untersuchten Konstellation ist dies die kritische Stelle bei der Entnahme des Bechers sowohl aus der linken als auch aus der rechten Becheraufnahme.

Die Entnahme eines Bechers aus der Aufnahme sollte bei ergonomisch passender Auslegung ohne Streifen oder Hängenbleiben an irgendeiner Störkontur möglich sein. In Realität wird ein leichtes Streifen des Bechers bei der Entnahme haptisch sofort an der Hand wahrgenommen. In der virtuellen Umgebung ist diese Art der haptischen Wahrnehmung so nicht möglich, allerdings wird der Anwender durch den beschriebenen Mechanismus der Kollisionskontrolle bei der Bewertung der Entnahmesituation unterstützt. Folglich ist es als hinreichende Voraussetzung für die Durchführung von Entnahmebewertungen eines Bechers in der virtuellen Umgebung anzusehen, ob es den Probanden in der VR-

Umgebung bewußt wird, wenn der Bechers eine Störkontur streift oder mit ihr kollidiert. Da den Probanden die Funktion der Kollisionskontrolle im virtuellen Fahrerplatzmodell vorher nicht bekannt ist, kann in der beschriebenen Situation auch beobachtet werden, ob die Verfärbung des Bechers intuitiv als Kollision mit einer Störkontur verstanden wird. Abbildung 3.26 zeigt exemplarisch die kritische Stelle bei der Entnahme des Bechers als minimaler Abstand zwischen Störkontur und Hüllkurve.

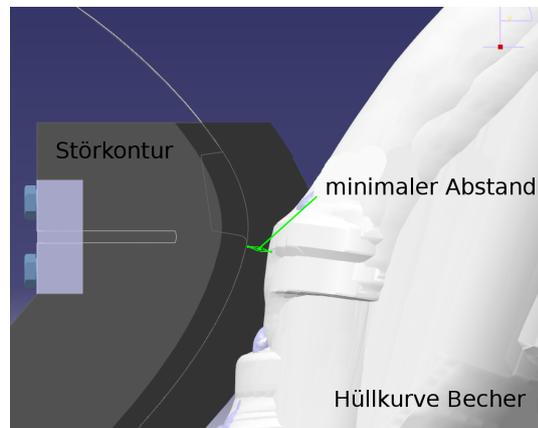


Abb. 3.26: Exemplarische Darstellung des minimalen Abstands zwischen Störkontur und Hüllkurve als kritische Stelle bei der Entnahme des Bechers

#### 3.3.2 Versuchsergebnisse

Bei der Analyse der Versuchsergebnisse fällt zunächst auf, dass die Probanden bei der Entnahme des Bechers aus beiden Aufnahmen im realen Modell die Störkontur bei keinem der 65 Entnahmevorgänge berühren. Im virtuellen Fahrerplatzmodell kommt es bei der Entnahme aus der linken Aufnahme in 4,6% der Fälle zu einer Kollision mit der virtuellen Schalttafel, bei der Entnahme aus der rechten Aufnahme ist dies bei 26,2% der Entnahmebewegungen der Fall. Allerdings haben die Probanden in allen Fällen die Kollision bemerkt und sind somit in der Lage dies in die Bewertung einfließen zu lassen oder die Entnahme nochmals durchzuführen. Die Verfärbung des Bechers wurde von allen Probanden im Erstkontakt als Kollisionsrückmeldung verstanden.

Im Folgenden werden die Entnahmevorgänge der Probanden im Detail analysiert: Der gemittelte minimale Abstand beträgt für den linken Cup im realen Modell 26,7mm (Standardabweichung  $s=2,9\text{mm}$ ). Im virtuellen Fahrerplatzmodell ist dieser minimale Abstand kleiner, er beträgt nur 20,1mm ( $s=5,3\text{mm}$ ). Die statistische Auswertung mittels T-Test nach Student für gepaarte Stichproben (zweiseitig) ergibt signifikante Unterschiede ( $p < .01$ ).

Für die Entnahmekurven des rechten Cups ergibt sich ein gemittelter minimale Abstand von 18,5mm ( $s=2,1\text{mm}$ ) für das reale Modell und ein gemittelter minimaler Abstand von 7,6mm ( $s=5,2\text{mm}$ ) für das virtuelle Fahrerplatzmodell. Auch diese Mittelwertsunterschiede sind statistisch signifikant ( $p < .01$ ).

### 3.3 Entnahmebewegungen in virtuellen und realen Umgebungen

Es werden Korrelationen für den minimalen Abstand zwischen Schalttafel und Cup für das reale Modell und das virtuelle Fahrerplatzmodell bestimmt. Die zugehörigen Graphen sind in Abbildung 3.27 dargestellt. Für die Bewegungskurve des linken Cups ergeben sich aus dieser Analyse nur sehr niedrige Zusammenhänge, der Korrelationskoeffizient (vgl. Heller u. a., 1974) beträgt  $r_{\text{linker Cup}} = .04$ . Bei der Bewegungskurve des rechten Cups zeigen sich mittlere negative Zusammenhänge ( $-.40 > r \geq -.70$ ), der Korrelationskoeffizient (vgl. Heller u. a., 1974) beträgt  $r_{\text{rechter Cup}} = -.43$ .

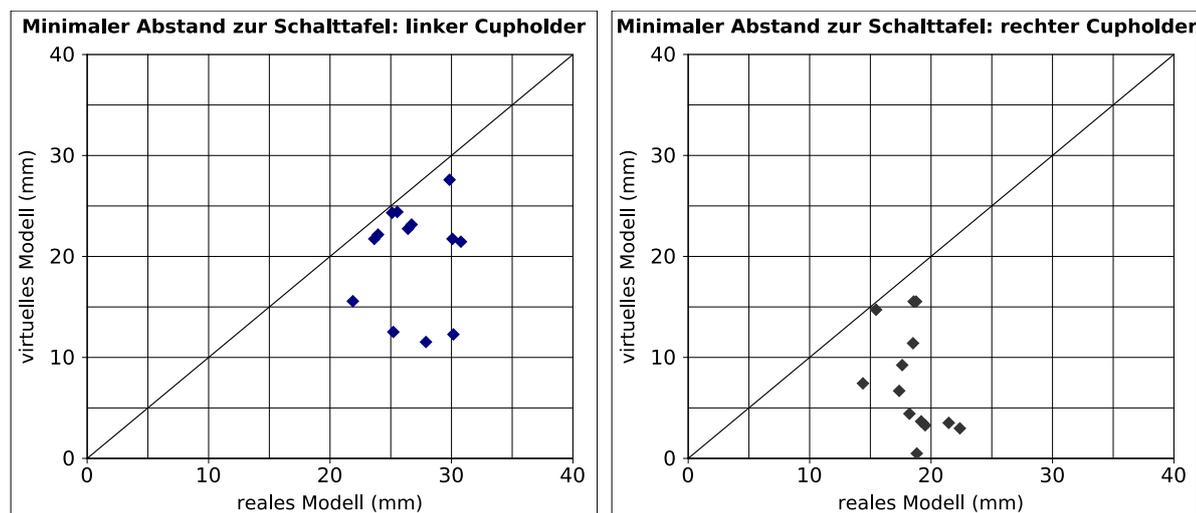


Abb. 3.27: Vergleich der Bewegungskurven des linken und rechten Cups im realen Modell und im virtuellen Fahrerplatzmodell: minimaler Abstand zwischen Becher und Schalttafel bei Entnahme aus der linken bzw. rechten Aufnahme, gemittelt für die einzelnen Probanden

Es zeigt sich, dass die Bewegungskurven im virtuellen Fahrerplatzmodell hinsichtlich des minimalen Abstands zur Schalttafel im Mittel näher an der Schalttafel verlaufen als im realen Modell. Kollisionen mit der Störkontur treten bei der Entnahme aus dem rechten Becherhalter öfter auf als aus dem linken Becherhalter. Vermutlich unterscheiden sich die beiden Entnahmesituationen hinsichtlich ihrer Komplexität für den Anwender aufgrund folgender Faktoren: die rechte Aufnahme ist weiter vom Fahrerplatz entfernt zudem sind die Haltekräfte zur Entnahme des Bechers bei dieser Aufnahme höher, damit entsteht bei manchen Probanden eine ruckartige Bewegung. Die Kompensation dieser ruckartigen Bewegung benötigt eine bestimmte Zeit, sodass die Bewegungsbahn tendenziell näher an der Störkontur entlang führt. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Probanden mit Hilfe der Kollisionskontrolle in der Lage sind, Kollisionen schon ab leichten Berührungen des Bechers mit der Störkontur zu bemerken und somit bei einer ergonomischen Bewertung einer Becherentnahme unterstützt werden. Allerdings zeigt sich auch, dass die Probanden in der virtuellen Umgebung den Becher signifikant näher an einer Störkontur vorbeiführen, als sie dies in einem realen Modell tun. Damit stellt das virtuelle Modell die Bewertungssituation kritischer dar als in Realität. Folglich lässt sich

die virtuelle Simulation als Bestätigung einer möglichen Entnahmebewegung betrachten: Lässt sich der Becher in der virtuellen Umgebung gut entnehmen, ist dies aller Voraussicht nach auch in der Realität möglich. Kommt es bei der virtuellen Simulation zu starken Problemen durch Streifen oder Hängenbleiben an einer Störkontur, muss dies in einem realen Modell verifiziert werden. Die Versuchsergebnisse zeigen auch, dass es sich bei der virtuellen Entnahme des Bechers um eine Expertenfunktionalität des virtuellen Fahrerplatzmodells handelt. Die Probanden mit der meisten Erfahrung im Umgang mit dem virtuellen Fahrerplatzmodell haben bei der Entnahmebewegung sowohl im realen Modell als auch im virtuellen Fahrerplatzmodell den nahezu gleichen minimalen Abstand zur Störkontur eingehalten (vgl. Wertepaare nahe an der Geraden  $y=x$  in Abbildung 3.27). Zwar konnte im Versuch zur Größenwahrnehmung (siehe Kapitel 3.1) kein Effekt nachgewiesen werden, der eine unterschiedliche Größenwahrnehmung abhängig von der Erfahrung mit dem VR-System belegt. Die vorliegenden Ergebnisse zu virtuellen Entnahmekurven lassen sich aber als leichte Tendenz in diese Richtung interpretieren, die sich mit zunehmender Komplexität der Aufgabe weiter verstärkt. Allerdings muss man weiterhin feststellen, dass die gemessenen mittleren Unterschiede der Entnahmekurven (10,9mm rechts und 6,6mm links) sich bezogen auf die Entfernung vom Probanden (ca. 600mm) prozentual in der Nähe der in Kapitel 3.1 festgestellten Abweichungen bewegen (rechts 1,8% und links 1,1%).

## 3.4 Sitzposition im Fahrzeug

Als letzte Komponente der Validierung des virtuellen Fahrerplatzmodells zur Verwendung für Ergonomiebewertungen in der frühen Konzeptphase der Fahrzeugentwicklung soll im folgenden Kapitel eine Untersuchung zur Positionierung des Anwenders im virtuellen Fahrerplatzmodell vorgestellt werden. Die Untersuchungen zur Größenwahrnehmung und zu ergonomischen Bewertungskriterien haben aufgrund ihres Versuchsaufbaus jeweils die Einschränkung, dass den Probanden die Sitzposition im Modell vorgegeben wird. Um die in der Simulationsumgebung erhaltenen Ergebnisse auf ein reales Fahrzeug übertragen zu können, muss sichergestellt sein, dass die Anwender im virtuellen Fahrerplatzmodell in gleicher Weise sitzen wie in einem realen Fahrzeug. Dies gilt vor allem für die Beurteilung von Auffindbarkeiten, Erreichbarkeiten und Bedienbarkeiten, da bei diesen Bewertungskriterien die Wahl der Sitzposition von entscheidender Bedeutung ist. Geeignete Parameter zur Messung der Fahrerpositionierung im Fahrzeug sind die Freiheitsgrade der Sitz- und Lenkradeinstellung im Fahrzeug sowie der Augpunkt des Fahrers.

### 3.4.1 Vergleichbare Studien und Ableitung des Versuchskonzepts

Lorenz u. a. (2008) empfehlen als Ergebnis ihrer Studien zu Sitzpositionen in virtuell simulierten Fahrzeuginnenräumen folgendes Vorgehen zur Positionierung eines Anwenders im Fahrzeug: Der Anwender stellt sich Sitz und Lenkrad aus einer jeweils standardisierten Startposition direkt in der mittels HMD visualisierten VR Umgebung ein, eine individuelle Vorpositionierung oder das Einstellen des Sitzes ohne HMD führen nach Lorenz u. a. (2008) zu Unterschieden im Bezug auf die Positionierung im realen Fahrzeug. Allerdings treten bei Lorenz u. a. (2008) unabhängig vom Vorgehen bei der Positionierung Unterschiede bei der Lenkradpositionierung zwischen realem Modell und virtuellem Äquivalent auf. Desweiteren weisen Lorenz u. a. (2008) explizit daraufhin, dass die von ihnen festgestellten Abweichungen und Empfehlungen nicht zwangsläufig auf andere Systeme übertragbar sind. Als Argument hierfür führen sie primär die spezifischen Randbedingungen des von ihnen verwendeten Modells an.

Lorenz (2010) hat in ausführlichen Vergleichsuntersuchungen zur Sitzposition in Fahrzeugen festgestellt, dass die gewählten Sitzpositionen im virtuellen Fahrerplatzmodell, das in den bisher in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen verwendet wird, einen hohen Korrelationsgrad zu den Sitzpositionen in einem realen Fahrzeug aufweisen. Allerdings lassen sich Abweichungen im Augpunkt<sup>12</sup> und bei der Lenkradeinstellung feststellen, diese betreffen aber jeweils nur die Komponente in Richtung der Fahrzeughochachse (z-Richtung).

Diese Abweichungen stellen den Ausgangspunkt für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen dar. Es soll ermittelt werden, wodurch diese Abweichungen verursacht werden und wie sie gegebenenfalls kompensiert werden können. Zunächst müssen die Abweichungen nochmals detailliert betrachtet werden: Die Abweichungen im virtuellen Fah-

<sup>12</sup>Der Begriff Augpunkt wird in der vorliegenden Arbeit äquivalent zum Mittenaugen verwendet. Dies bezeichnet den geometrischen Mittelpunkt zwischen den beiden menschlichen Augen.

rerplatzmodell treten nur in z-Richtung im Augpunkt der Probanden und der von ihnen eingestellten Lenkradposition auf. Die Sitzeinstellung im virtuellen Fahrerplatzmodell entspricht der Einstellung im realen Fahrzeug, ebenso die Augpunktlage und Lenkradpositionierung in Fahrzeuglängsrichtung (x-Richtung). Die mittlere Abweichung beträgt im Augpunkt ca. 16mm nach unten. Diese Zusammenhänge lassen folgende Interpretation zu: Die Probanden sind im virtuellen Fahrerplatzmodell „in sich zusammengesackt“. Als Folge des tieferen Augpunkts wird das Lenkrad tiefer eingestellt, um das Kombiinstrument vollständig einsehen zu können bzw. auch die individuelle Höhe des Lenkrads im Sichtfeld anzupassen. Die Vermutung liegt nahe, dass die veränderte Augpunktlage durch eine Beeinträchtigung bedingt wird, welche durch das HMD verursacht wird. Als Ursachen sind dabei zwei Faktoren denkbar: das durch das HMD eingeschränkte Sichtfeld des Anwenders und weitere durch das HMD verursachte mechanische Einschränkungen des Anwenders. Das eingeschränkte Sichtfeld kann sich dabei folgenderweise auswirken: Die Probanden orientieren sich bei der Sitzeinstellung am Lenkrad. Bei der vertikalen Ausrichtung im realen Fahrzeug ist im peripheren Sichtfeld immer das gesamte Lenkrad sichtbar. Nehmen die Probanden diese Sitzhaltung im virtuellen Fahrerplatzmodell ein, werden sie in ihrer Wahrnehmung getäuscht, da vom Lenkrad nur ein Teil des oberen Lenkradkranzes sichtbar ist. Die gefühlte Sitzposition stellt sich für sie folglich höher als im Realfahrzeug dar. Dies wird durch ein Einsacken im Torso bzw. eine Tieferpositionierung des Kopfes kompensiert. Ebenfalls eine Rolle kann die Neigung des HMD auf dem Kopf des Probanden spielen. Dies wird so positioniert, dass der Sichtstrahl der Probanden möglichst senkrecht auf die HMD-Displays trifft, d.h. es entspricht nicht der Ausrichtung des realen Sichtfelds leicht nach unten. Zweiter potentieller Einflußfaktor sind die mechanischen Einschränkungen, die das HMD hervorruft. Durch die helmartige Konstruktion des HMD sind die Probanden in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt. Der Helm hat ein Gewicht von ca. 1 kg, zusätzlich behindert die Verkabelung an der Hinterseite des Helms die Bewegungen des Anwenders. Ziel der Untersuchung ist daher die Validierung der Einschränkungen durch ein HMD bei der Positionierung im Fahrzeug. Als Versuchsmethodik eignet sich hierfür eine Vergleichsstudie in einem Realfahrzeug bei der die Probanden ihre Sitzposition mit einer Einschränkung des Sichtfelds und der durch ein HMD hervorgerufenen weiteren mechanischen Einschränkungen einstellen. Dabei wird der Versuchsaufbau von Lorenz (2010) um mehrere Versuchsreihen erweitert<sup>13</sup>. Dies hat den Vorteil, dass ein Vergleich mit diesen Versuchsergebnissen möglich ist. Zudem werden durch eine Durchführung ohne Visualisierung virtueller Daten, jegliche durch die VR-Simulation hervorgerufene Störeinflüsse ausgeschlossen.

---

<sup>13</sup>Auch in den weiteren Versuchsreihen sollen nur jeweil x- und z-Komponente von Augpunkt, Lenkradeinstellung und H-Punkt aufgenommen werden. Die y-Komponente von Sitz und Lenkrad lässt sich im Normalfall vom Fahrer im Fahrzeug nicht einstellen, sondern ist vorgegeben. Ähnlich verhält es sich mit der y-Komponente des Augpunkts. Bei einer geraden Körperhaltung bzw. Fahrhaltung befindet sich der Augpunkt in Fahrzeugquerrichtung mittig über dem Sitz, dies wird in der vorliegenden Studie als vereinfachende Voraussetzung postuliert.

### 3.4.2 Versuchsbeschreibung

Durch die Studie von Lorenz (2010) liegen Messwerte für die Sitzposition von 45 Probanden in einem Realfahreug und im virtuellen Fahrerplatzmodell vor, jeweils als x- und z-Komponente von Sitzeinstellung, Lenkradeinstellung und Augpunkt. Das Probandenkollektiv von 46 Probanden wird in zwei Versuchsreihen aufgeteilt: Versuchsreihe I führt die Sitz- und Lenkradeinstellung im Fahrzeug mit einer Einschränkung des FoV und einer mechanischen Einschränkung durch, die äquivalent zur mechanischen Einschränkung durch das HMD im virtuellen Fahrerplatzmodell ist. Versuchsreihe II unterscheidet sich von Versuchsreihe I dadurch, dass keine Einschränkung des FoV erfolgt. Damit lässt sich der Einfluß sowohl der mechanischen Einschränkung als auch des eingeschränkten Sichtfeld auf die Positionierung im Fahrzeug untersuchen.

Die Umsetzung der Einschränkungen im Versuchsaufbau werden im folgenden Abschnitt beschrieben: Zur Simulation der mechanischen Einschränkungen wird den Probanden ein HMD aufgesetzt. Dabei werden die Komponenten, die sich normalerweise vor den Augen des Probanden befinden soweit entfernt, dass keine Einschränkung des FoV mehr besteht. Durch die Verwendung des HMD kann die Gewichtsverteilung auf dem Kopf des Probanden realitätsgetreu dargestellt werden. Das durch die Entfernung der Komponenten verringerte Gewicht wird durch Zusatzgewichte im für den Probanden nicht sichtbaren Bereich kompensiert. Die Anschlußkabel auf der Rückseite des Helms werden im Fahrzeug an der Rückseite des Vordersitzes befestigt. Dabei wird die Bewegungsfreiheit analog zur Situation im virtuellen Fahrerplatzmodell eingeschränkt, zusätzlich wird hierzu die Kopfstütze des Sitzes ausgebaut. Für die Einschränkungen gemäß Versuchsreihe I wird zusätzlich das FoV der Probanden eingeschränkt. Das verwendete HMD läßt sich auch für halbtransparente Darstellungen verwenden, dieser Aspekt wird im vorliegenden Versuchsaufbau genutzt, allerdings wird keine Visualisierung in den Helm eingespielt. Die Probanden erleben in Versuchsreihe I ihre reale Umwelt allerdings mit den durch das HMD bedingten Einschränkungen, insbesondere der gerade beschriebenen Einschränkungen des Sichtfelds.

Die Erfassung der Messvariablen Sitzeinstellung, Lenkradeinstellung und Augpunkt wird in folgendem Abschnitt beschrieben. Sitz- und Lenkradposition werden über die jeweils verbauten Steuergeräte ausgelesen. Dabei werden über einen Umrechnungsalgorithmus aus den jeweiligen Stellwertpositionen das Hüftzentrum des Probanden (Sitzeinstellung) bzw. das Lenkradzentrum (Lenkradeinstellung) ermittelt und ins Fahrzeugkoordinatensystem transformiert. Der verwendete Fahrzeugsitz ist elektrisch verstellbar und verfügt über folgende Verstellmöglichkeiten: Längsverstellung, Höhenverstellung, Sitzflächenneigungsverstellung, Lehnenneigungsverstellung und Anpassung der Lendenwirbelunterstützung (Lordoseverstellung). Um eventuell auftretende Toleranzen zwischen verschiedenen Sitzen der gleichen Baureihe auszuschließen wird sowohl im Realfahrzeug als auch im virtuellen Fahrerplatzmodell derselbe Sitz verwendet. Die Augpunkte der Probanden werden mit Hilfe eines photographischen Verfahrens berührungslos gemessen. Dazu wird der Proband aus zwei definierten Kamerapositionen fotografiert. Auf den Bildern sind neben den Augpunkten der Probanden auch vorher vermessene Marker zu sehen. Mittels Triangulation lassen sich unter Zuhilfenahme dieser Marker die Position

der Augen des Probanden im Fahrzeugkoordinatensystem bestimmen. Die intrapersonale Streuung bei der Positionierung im Fahrzeug aufgrund der Einstellung von Sitz- und Lenkradeinstellung muss berücksichtigt werden. Aus diesem Grund muss die Einstellung von den Probanden mehrmals durchgeführt werden, die in dieser Untersuchung verwendeten Ergebnisse stellen die Mittelwerte aus fünf Einstellvorgängen dar. Aufgrund der Versuchskonzipierung als Vergleichsuntersuchung positioniert sich jeder Proband ohne Einschränkungen und mit den Einschränkungen gemäß der jeweiligen Versuchsreihe. Dies entspricht einer Gesamtzahl von 10 Einstellvorgängen pro Versuchsteilnehmer. Ein Teil der Probanden beginnt mit den Einstellungen ohne Einschränkungen, der andere mit den Einstellvorgängen mit Einschränkungen. Die Verteilung erfolgt zufällig und dient dazu, mögliche Reihenfolgeeffekte zu verringern. Der Versuchsablauf sieht dabei folgendermaßen aus: zunächst befinden sich sowohl Sitz als auch Lenkrad in Ausgangsposition. Die Probanden setzen vor dem Einsteigen ins Fahrzeug für den entsprechenden Versuchsteil den Helm auf. Die Probanden steigen anschließend ins Fahrzeug und stellen sich sowohl Sitz als auch Lenkrad ein. Damit erfolgt die Sitzeinstellung gemäß den Empfehlungen von Lorenz u. a. (2008). Dabei werden sie vom Versuchsleiter daraufhin gewiesen eine Einstellung gemäß ihrer individuellen Präferenzen bezüglich ihrer gewohnten Fahrhaltung vorzunehmen. Die Probanden werden aufgefordert, eine Fahrhaltung mit Blickrichtung nach vorne einzunehmen. Anschließend werden die Messvariablen aufgenommen. Vor dem nächsten Einstellvorgang müssen die Probanden das Fahrzeug verlassen, der Helm wird allerdings aufbewahrt. Sitz und Lenkrad werden in die standardisierte Ausgangsposition gebracht und der nächste Einstellvorgang wird durchgeführt. Der Ablauf ohne Einschränkungen verläuft analog.

Im Anschluß beantworten die Probanden einen Fragebogen zum subjektiven Eindruck der Beeinträchtigung bei der Positionierung im Fahrzeug. Es werden die demographischen Daten der Probanden dokumentiert. Die Ergebnisse des Fragebogens und demographische Daten finden sich in Anhang C.1 und C.2.

#### 3.4.3 Versuchsergebnisse

Ziel der Untersuchung ist die Validierung der Einschränkungen durch ein HMD bei der Positionierung im Fahrzeug. Daraus ergibt sich die folgende (**Haupt-**)**Nullhypothese**  $H_{0,H}$  :

*Sowohl die durch ein HMD verursachten mechanischen Einschränkungen als auch das eingeschränkte Sichtfeld haben keinen Einfluss auf die Positionierung des Fahrers im Fahrzeug. Die Positionierung mit HMD entspricht einer Positionierung ohne HMD.*

Dementsprechend lautet die **Alternativhypothese**  $H_{1,H}$  :

*Sowohl die durch ein HMD verursachten mechanischen Einschränkungen als auch das eingeschränkte Sichtfeld haben einen Einfluss auf die Positionierung des Fahrers im Fahrzeug, insbesondere die Position des Hüftpunkts, des Augpunkts und die Lage des Lenkrads.*

Für die Auswertung werden die gemittelten Positionierungsdaten der Probanden aus den beiden Versuchsreihen analysiert und mit den Positionierungsdaten aus einem Realfahrzeug (ohne Einschränkung durch ein HMD) verglichen. Im Anschluß erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse der Untersuchung der vorliegenden Arbeit mit den Ergebnissen von Lorenz (2010).

Zur statistischen Auswertung der Positionierungsdaten wird auf die Methode der linearen Regressionsanalyse zurückgegriffen. Damit ist es möglich die in der Untersuchung ermittelten Daten in ein mathematisches Modell zu überführen, welches dazu verwendet werden kann die Sitzhaltung in einem Realfahrzeug anhand der Sitzeinstellungen aus den Versuchsreihen der vorliegenden Untersuchung zu prognostizieren. Da in den Versuchsreihen auch die Positionierungsdaten aus einem Realfahrzeug aufgenommen wurden, kann dieses mathematische Modell Anhaltspunkte über die Unterschiede zwischen der Positionierung der Probanden in den Versuchsreihen und im Realfahrzeug geben.

Zunächst werden die Regressionsanalysen für alle Messvariablen (Augpunkt in x-Richtung und z-Richtung, H-Punkt in x-Richtung und z-Richtung und Lenkradpunkt in x-Richtung und z-Richtung) aus den Versuchsreihen I und II durchgeführt und in entsprechenden Graphen veranschaulicht. Dabei zeigt die Abszisse die Daten der jeweiligen Messvariablen mit den jeweiligen Einschränkungen der Versuchsreihen. Die Ordinatenachse enthält die Werte der entsprechenden Messvariablen des realen Fahrzeugs, d.h. ohne die HMD spezifischen Einschränkung. Abbildung 3.28 zeigt die Positionierungsergebnisse zum Augpunkt der Probanden.

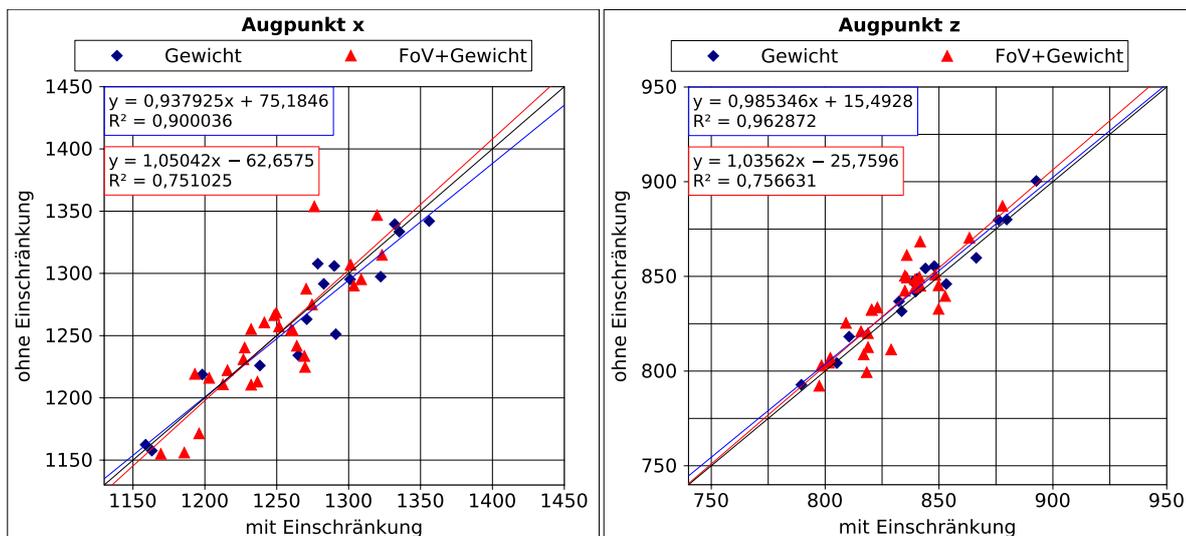


Abb. 3.28: Positionierungsdaten der Augpunkte der Probanden aus Versuchsreihe I (Gewicht) und Versuchsreihe II (FoV+Gewicht) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

Die Abweichung der Regressionsgeraden von der Diagonalen im Diagramm beschreibt die in den jeweiligen Versuchsreihen auftretenden Abweichungen. Zur Beurteilungen der Vorhersagegüte des aufgestellten mathematischen Modells werden zusätzlich fol-

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

gende Kennwerte herangezogen: der Standardfehler des Schätzers und der Regressionskoeffizient ( $R^2$ ). Bezüglich der Positionierungsdaten der Augpunkte zeigen sich sowohl in x-Richtung als auch in z-Richtung nur geringfügige Abweichungen zwischen den beiden Versuchsreihe I und II und dem Realfahrzeug. Für den Augpunkt zeigen sich in beiden Koordinatenrichtungen hohe Zusammenhänge (Korrelationskoeffizienten  $.70 < r < 1.00$ ). Der Standardfehler beschreibt hier die durchschnittliche Abweichung vom Idealwert, d.h. der Einstellung im Realfahrzeug, er beträgt bei der Einschränkung nur durch das Gewicht des Helms (Versuchsreihe I) für den Augpunkt in x-Richtung 19,4mm. Für die zusätzliche Einschränkung des Sichtfelds (Versuchsreihe II) tritt ein Standardfehler von 24,8mm auf. Die Regressionskoeffizienten weisen für beide Versuchsreihen bezogen auf den Augpunkt in beiden Koordinatenrichtungen eine hohe Vorhersagegüte auf ( $R^2_{Gewicht} > .93$  und  $R^2_{FoV+Gewicht} > .75$ ). Der Standardfehler beträgt in z-Richtung für Versuchsreihe I 5,7mm und für Versuchsreihe II 11,8mm. Die genannten Kennzahlen und auch die graphische Darstellung in Abbildung 3.28 zeigen, dass der Augpunkt in der vorliegenden Untersuchung in beiden Versuchsreihen sehr nahe an der Positionierung in einem realen Fahrzeug ist, d.h. der Einfluß der mechanischen Einschränkungen eines HMD und des Einschränkung des Sichtfelds haben nur sehr geringe Abweichungen zur Folge. Eine Interpretation der dargestellten Kennzahlen zeigt, dass die Einschränkungen in Versuchsreihe II zu größeren Abweichungen der Positionsdaten des Augpunktes zum Realfahrzeug als Versuchsreihe I führen.

Als nächstes werden die Positionierungsergebnisse zum H-Punkt (Hüftzentrum) der Probanden analysiert. Auch hier zeigen sich für die beide Versuchsreihen I und II in beiden Koordinatenrichtungen hohe Zusammenhänge bezüglich der gemessenen Daten aus dem Realfahrzeug (vgl. Abbildung 3.29).

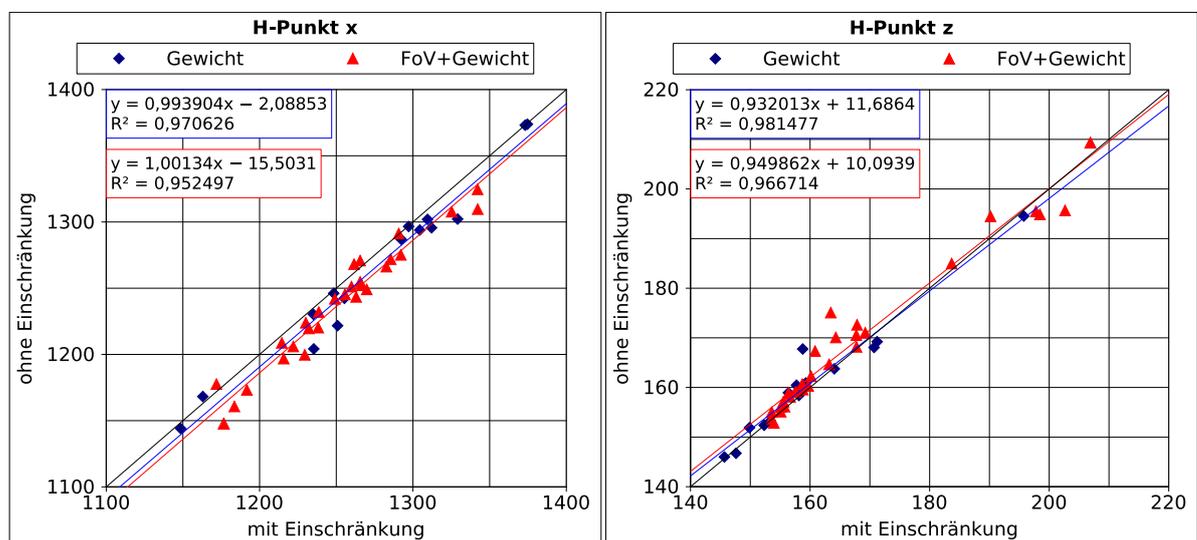


Abb. 3.29: Positionierungsdaten der H-Punkte der Probanden aus Versuchsreihe I (Gewicht) und Versuchsreihe II (FoV+Gewicht) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

Die Korrelationskoeffizienten weisen hohe Zusammenhänge der H-Punkt-Positionierung mit und ohne Einschränkungen aus den beiden Versuchsreihen aus ( $r < .97$ ). Die Kennzahlen zur Güte der Vorhersagbarkeit mittels der berechneten Regressionsgleichung zeigen geringe Abweichungen der beiden Versuchsreihen zum Realfahrzeug. Der Standardfehler für die Abweichungen vom realen H-Punkt in x-Richtung beträgt 11,8mm in Versuchsreihe I und 10,5mm in Versuchsreihe II. In Richtung der z-Koordinate betragen die Standardfehler 2,7mm (Versuchsreihe I) und 3,2mm (Versuchsreihe II). Damit ergeben sich für die Positionierungsdaten des H-Punkts im vorliegenden Versuch nur sehr geringe Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Einschränkungen und insbesondere nur sehr geringe Abweichungen zu den Daten aus dem Realfahrzeug.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auch bei den Positionierungsdaten des Lenkrads. Alle Korrelationskoeffizienten, sowohl aus Versuchsreihe I als auch aus Versuchsreihe II weisen auf hohe Zusammenhänge zwischen den Einstellungen mit Einschränkungen und denen ohne Einschränkung hin, dies zeigt sich jeweils in x-Richtung und in z-Richtung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.30 veranschaulicht.

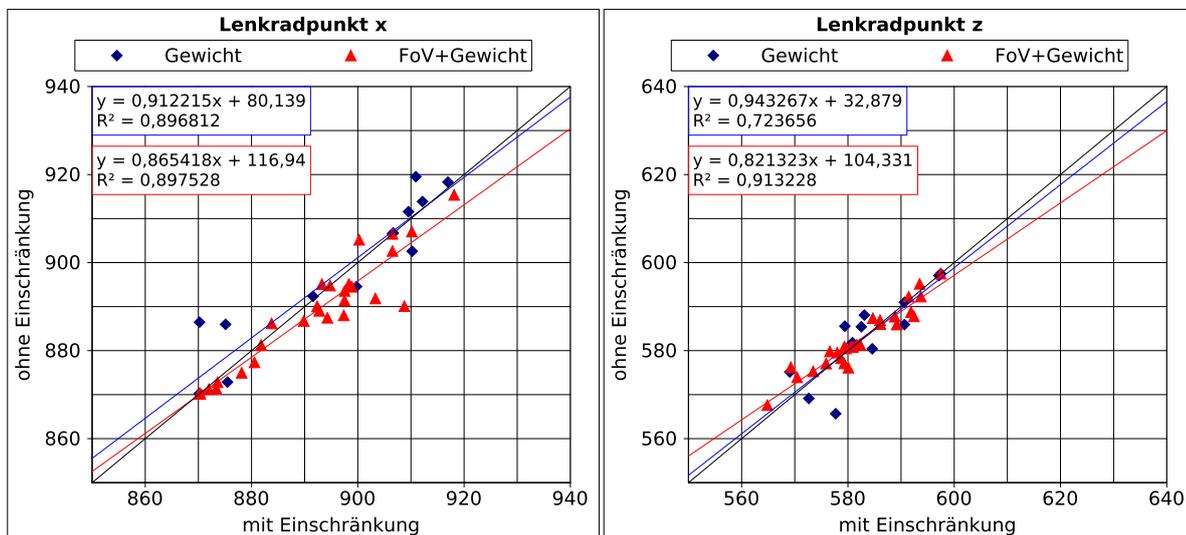


Abb. 3.30: Positionierungsdaten der Lenkradeinstellung der Probanden aus Versuchsreihe I (Gewicht) und Versuchsreihe II (FoV+Gewicht) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

Der Standardfehler für die Lenkradeinstellung mit Einschränkung durch das Gewicht des Helms (Versuchsreihe I) beträgt in x-Richtung 6mm und in z-Richtung 4,8mm. Für die zusätzliche Einschränkung des Sichtfelds (Versuchsreihe II) ergeben sich Standardfehler von 4,2mm in x-Richtung und 2mm in z-Richtung. Zwischen den beiden Versuchsreihen lassen sich im Bezug auf die Lenkradeinstellung der Probanden nur sehr geringe Unterschiede feststellen, lediglich der Regressionskoeffizient für den Lenkradpunkt in z-Richtung weist für Versuchsreihe I ( $R^2_{\text{Gewicht}} = .72$ ) einen etwas geringeren Wert im Vergleich zu Versuchsreihe II ( $R^2_{\text{FoV+Gewicht}} > .91$ ) auf.

### 3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

Die Alternativhypothese  $H_{1,H}$  kann mit den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht bestätigt werden. Die durch ein HMD verursachten und in der vorliegenden Studie untersuchten mechanischen Einschränkungen als auch das eingeschränkte Sichtfeld scheinen keinen Einfluß auf die Positionierung im Fahrzeug zu haben. Es stellt sich die Frage, wie die von Lorenz (2010) ermittelten Unterschiede im Bezug auf die Positionierung im virtuellen Fahrerplatzmodell zustande gekommen sind. Diese können einerseits durch die Visualisierung in den Displays des HMD zustande kommen, andererseits soll auch die in der Studie von Lorenz (2010) verwendete Messmethodik nochmals detailliert betrachtet werden. Zunächst sollen die Abweichungen bezüglich der Positionierungsdaten zwischen virtuellem Fahrerplatzmodell und Realfahrzeug veranschaulicht werden. Die Abbildung 3.31, 3.32 und 3.33 zeigen die zugehörigen Wertepaare, zum Vergleich sind zusätzlich auch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen I und II gemeinsam als vom HMD verursachte Einschränkungen behandelt. Dies scheint plausibel, da in den vorausgehend angestellten Analyseschritten nur sehr geringe Abweichungen zwischen diesen beiden Versuchsteilen auftraten. Die Darstellung der Regressionsgleichungen und -koeffizienten runden die Darstellungen ab.

Tabelle 3.4 gibt einen Überblick zum Vergleich der Kennzahlen der Regressionsanalyse aus der vorliegenden Studie und der Untersuchung von Lorenz (2010).

		<i>Standardfehler [mm]</i>		<i>Regressionskoeffizient <math>R^2</math></i>	
		<i>Virt. FPM</i>	<i>HMD Einschr.</i>	<i>Virt. FPM</i>	<i>HMD Einschr.</i>
Augpunkt	x	29,6	22,9	.79	.81
	z	11,3	10	.85	.85
H-Punkt	x	22,6	10,8	.82	.96
	z	7,5	3	.67	.97
Lenkradpunkt	x	6	5,3	.82	.87
	z	4,1	3,2	.71	.82

Tab. 3.4: Übersicht zum Vergleich der Ergebnisse zur Positionierung im virtuellen Fahrerplatzmodell von Lorenz (2010) (Virt. FPM) und den nur durch das HMD verursachten Einschränkungen (HMD Einschr.)

Vergleicht man die Standardfehler zu den verschiedenen Positionierungsdaten im virtuellen Fahrerplatzmodell und in der Untersuchung zu den HMD Einschränkungen so fällt auf, dass sich die Abweichungen jeweils im Millimeterbereich bewegen. Lediglich beim Augpunkt in x-Richtung und beim H-Punkt in x-Richtung sind hier Unterschiede feststellbar. Da diese Größe als ein Maß für die Abweichung vom idealen realen Wert gesehen werden kann, wird deutlich, dass der Einfluß der VR-Simulation eine größere Streuung dieser Werte im Vergleich zu den nur vom HMD verursachten Abweichungen bewirkt. Als mögliche Ursache sei an dieser Stelle nochmals auf die Mechanismen der Tiefenwahrnehmung im HMD und insbesondere die Unterschiede zur realen Tiefenwahrnehmung hingewiesen. Dieser Zusammenhang lässt sich auch in den Abbildungen

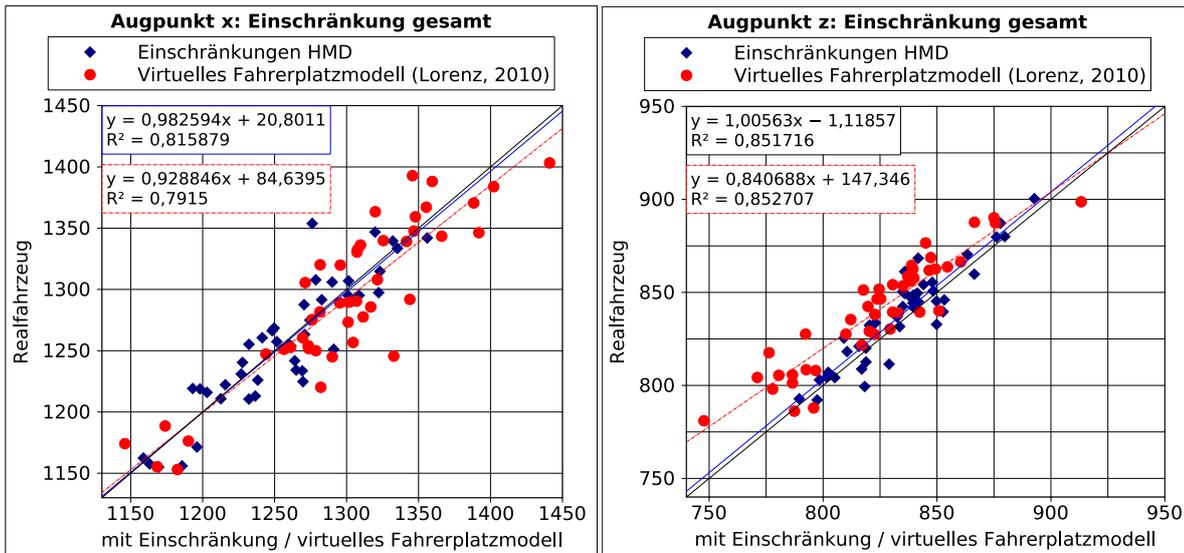


Abb. 3.31: Positionierungsdaten der Augpunkte der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

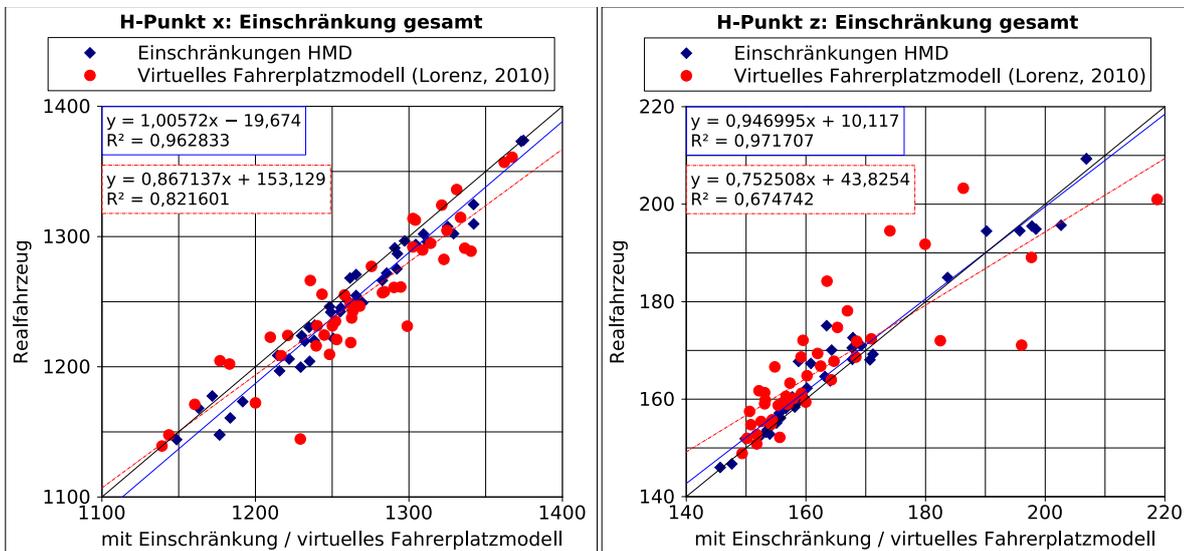


Abb. 3.32: Positionierungsdaten der H-Punkte der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

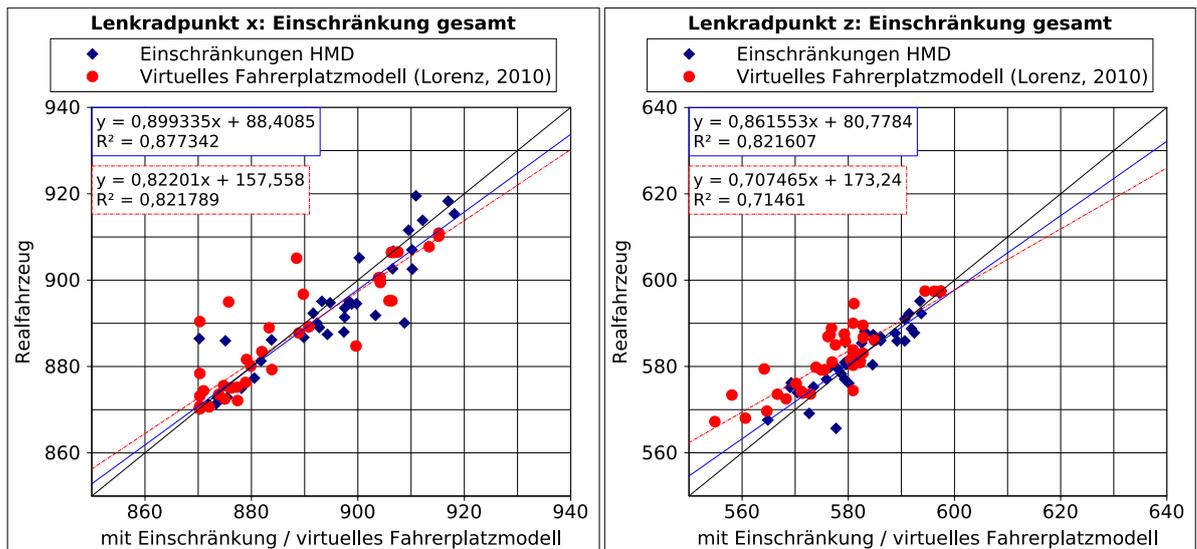


Abb. 3.33: Positionierungsdaten der Lenkradeinstellung der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

3.31, 3.32 und 3.33 anschaulich nachvollziehen. Beim Vergleich der Regressionskoeffizienten (vgl. Tabelle 3.4 zeigen sich Unterschiede beim H-Punkt in x- und z-Richtung. Allerdings bewegen sich auch hier die Abweichungen in einem Bereich, der das virtuelle Fahrerplatzmodell noch als geeignetes Simulationswerkzeug erscheinen lässt. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen lassen sich diese Abweichungen wiederum der VR-Visualisierung im HMD zuschreiben. Abschließend soll nochmals detailliert auf die Abweichungen der Augpunktkoordinate in z-Richtung eingegangen werden. Wie eingangs bereits dargestellt, lässt sich hier im virtuellen Fahrerplatzmodell bis auf einige wenige Ausnahmen erkennen, dass die Ergebnisse aus den Probandenversuchen im virtuellen Fahrerplatzmodell eine tiefer liegende z-Komponente aufweisen. Dies zeigt sich in Abbildung 3.31 (rechts) daran, dass sich der überwiegende Teil der Datenpunkte zum virtuellen Fahrerplatzmodell über der Diagonalen befinden. Auf den möglichen Einfluß der Visualisierung im HMD wurde schon hingewiesen, allerdings besteht bei den Positionierungsdaten zum Augpunkt ein weiterer Unterschied zwischen den Daten aus dem virtuellen Fahrerplatzmodell einerseits sowie dem Realfahrzeug und den Daten aus der Studie zu den von einem HMD verursachten Einschränkungen andererseits. Als Messmethodik wurde im Realfahrzeug in der vorliegenden Arbeit und bei Lorenz (2010) ein fotografisches Messverfahren eingesetzt, wie im Kapitel zur Versuchsbeschreibung erläutert. Im virtuellen Fahrerplatzmodell konnte dieses Messverfahren nicht angewendet werden, da die Augen des Probanden durch das HMD und die Vorrichtung zur Abschottung der Displays verdeckt sind. Aus diesem Grund wurden zur Feststellung des Augpunkts die Daten aus dem optischen Markertracking des virtuellen Fahrerplatzmodells verwendet. Dieses idealisiert, wie bereits beschrieben, den virtuellen Augpunkt des Anwenders. Die Auswirkungen dieser Idealisierung können aber als relativ gering bezogen auf die

z-Koordinate angenommen werden, da dies über die Positionierungsvorschriften für das HMD möglichst ausgeglichen werden soll: Die Nutzer des HMD werden dazu aufgefordert, die Displays des HMD möglichst mittig vor ihren Augen zu platzieren. Hinzu kommt noch die Tatsache, dass die Displays des verwendeten HMD bei einer Abweichung des Sichtstrahls von wenigen Grad von der Normalen zur Displayfläche zu Verschattungen neigen. Dies bedeutet: um ein möglichst optimales Bild zu bekommen, müssen die Probanden die Displays möglichst orthogonal zu ihrem Sichtstrahl ausrichten. Um die Vermessung des Augpunkts durchführen zu können, werden die Probanden aufgefordert auf einen Fixationspunkt zu blicken, der sich in einer Entfernung von etwa 3m vor dem Fahrzeug in einer Höhe von etwa 1,3m befindet. Dieser Punkt wird sowohl im VR-System als auch im Realfahrzeug für die Probanden dargestellt. Bei der nochmaligen Kontrolle des Versuchs- bzw. Messaufbaus stellte sich allerdings folgender Zusammenhang dar. Bei einer vertikalen Ausrichtung des HMD-Displays, d.h. der theoretische Sichtstrahl des Anwenders auf die Displaymitte verläuft horizontal, befindet sich der Helm nicht wie erwartet in einer horizontalen Ausrichtung, sondern weist eine Winkelabweichung von ca.  $5^\circ$  zur Horizontalen auf. Dieser Ausrichtungsfehler ist mit dem bloßen Auge schwer zu erkennen, vor allem wenn der Helm von einem Probanden auf dem Kopf getragen wird. Insbesondere bedeutet dies, dass der gerade ausgerichtete Sichtstrahl (vorgegeben durch die Normale auf das HMD Display) und die Kamerarichtung eine Winkelabweichung aufweisen. Diese Situation ist in Abbildung 3.34 (rechts) dargestellt. Mittels Koordinatenmessmaschine und Daten aus dem Trackingsystem konnte diese Abweichung ermittelt werden.

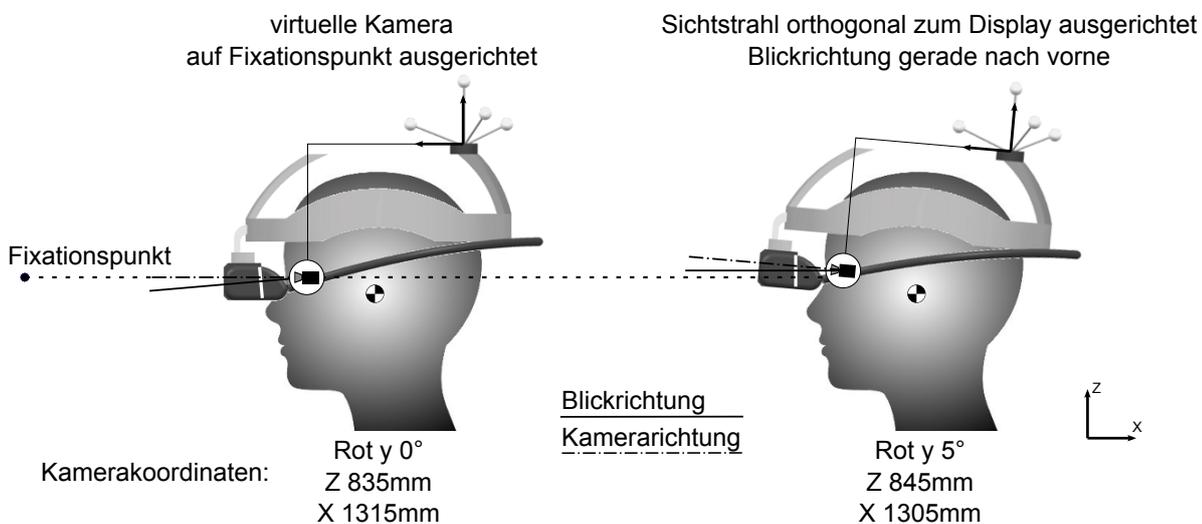


Abb. 3.34: Winkelfehler beim HMD Tracking

Im Versuchsaufbau gleichen die Probanden diese Abweichung beim Ausrichten auf den Fixationspunkt im virtuellen Fahrerplatzmodell durch eine Drehung des Helms um die Querachse aus, bis die virtuelle Kamera auf den Fixationspunkt ausgerichtet ist. Sche-

matisch ist dieser Zusammenhang in Abbildung 3.34 (links) dargestellt<sup>14</sup>. Der virtuelle Augpunkt wird im Trackingsystem als Ursprungspunkt des am Helm verbauten Markers gemessen. Dieser Ursprungspunkt ist über jeweils eine Komponente in x- und z-Richtung des lokalen Markerkoordinatensystems in den virtuellen Augpunkt des Anwenders verschoben. Damit bewegt sich der gemessene virtuelle Augpunkt gegenüber einer horizontal ausgerichteten Blickrichtung (vgl. Abbildung 3.34, rechts) in z-Richtung nach unten und x-Richtung nach hinten. Der Drehpunkt der beschriebenen Ausgleichsrotation kann allerdings nur schwer exakt vermessen werden, da er mit einer Verschiebung bzw. Rotation des gesamten Helms am Kopf des Probanden gleichzusetzen ist. Zur Ermittlung der translatorischen Abweichung im gemessenen Augpunkt wurde deshalb auf ein 1:1 Modell eines menschlichen Kopfes zurückgegriffen. Dabei wurde das HMD zunächst auf dem Kopfmodell platziert und mittels Trackingsystem auf eine Querrotation von 0° um die y-Achse ausgerichtet. Mittels Koordinatenmessmaschine wurde dann die Winkelabweichung der Displayfläche vermessen. Anschließend wurde das HMD so positioniert, dass die Displayfläche in der Vertikalen ausgerichtet ist. In beiden Positionen wurden jeweils die vom Trackingsystem ausgegebenen Koordinatenwerte in x- und z-Richtung dokumentiert. Diese exemplarischen Wertepaare sind in der Übersicht in Abbildung 3.34 den beiden vermessenen Positionen zugeordnet. Für die im virtuellen Fahrerplatzmodell gemessenen Augpunktkoordinaten ergeben sich damit Abweichungen in z-Richtung von ca. 10mm und in x-Richtung ebenfalls ca. 10mm.

Bei diesen Abweichungen handelt es sich um systematische Messfehler, welche die Messrohdaten der ermittelten Positionierungsdaten des Augpunkts im virtuellen Fahrerplatzmodell verfälschen. Es läßt sich also feststellen, dass die von Lorenz (2010) ermittelten Abweichungen bei den Positionierungsdaten des Augpunkts im virtuellen Fahrerplatzmodell unter anderem auf eine systematischen Messabweichung zurückzuführen sind. Die Größe der Abweichungen wurden in oben aufgeführter Herleitung bestimmt und können als Datentransformation auf die Rohdaten der Messung aus dem virtuellen Fahrerplatzmodell angewendet werden. Die neue Auswertung der korrigierten Messdaten zu den Positionierungskoordinaten des Augpunkts im virtuellen Fahrerplatzmodell ist in Abbildung 3.35 dargestellt.

Die grafische Auswertung der korrigierten Messwerte zeigt eine Angleichung der Augpunktkoordinaten zwischen virtuellem Fahrerplatzmodell und Realfahrzeug. Der Einfluß der VR-Simulation erscheint nochmals deutlich verringert. In den bisher zur Interpretation der Auswertung herangezogenen statistischen Kennwerten macht sich die Datentransformation nicht bemerkbar, da sie im Wesentlichen einer Verschiebung der Wertepaare in Richtung der Koordinatenachsen entspricht, Neigung der Regressionsgeraden und auch die Streubreite der Verteilung bleiben gleich. Der systematische Messfehler kann durch eine Neukalibrierung des Trackingsystems im Bezug auf das HMD ausgeglichen

---

<sup>14</sup>Die natürliche Ausrichtung des menschlichen Sichtstrahls von etwa 5° nach unten wird hier nur für die Erklärung des Zusammenhangs außen vor gelassen. Prinzipiell ändert diese Ausrichtung jedoch an der festgestellten Abweichung nichts, dies wird schnell klar, wenn man sich die beiden Darstellungen in Abbildung 3.34 um die natürliche Sehstrahlausrichtung gedreht vorstellt.

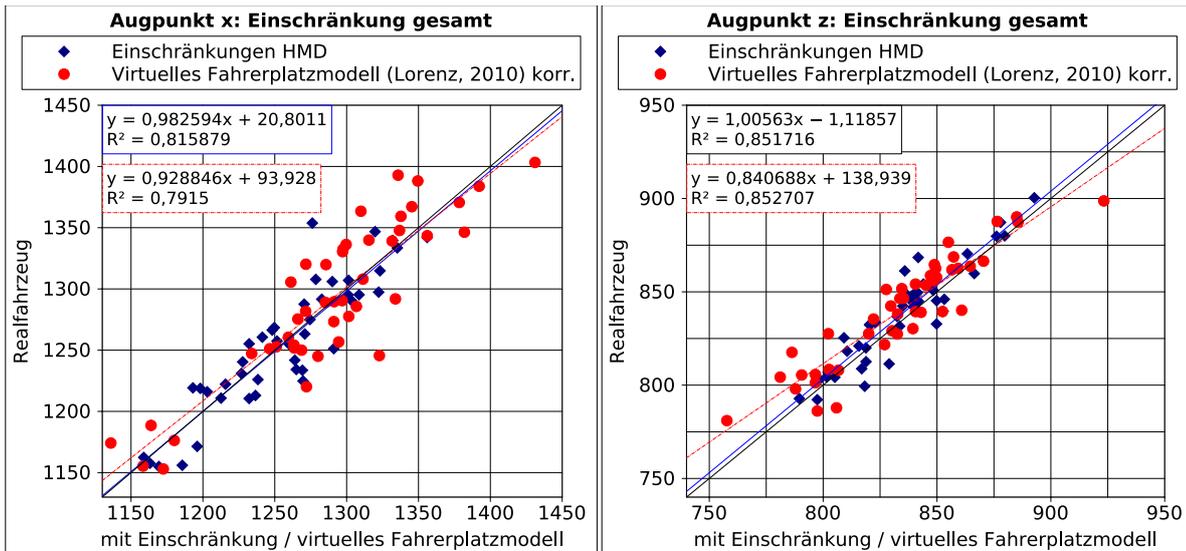


Abb. 3.35: Positionierungsdaten der Augpunkte der Probanden aus der vorliegenden Untersuchung sowie um die Messabweichung korrigierte Werte aus der Studie von Lorenz (2010) in x-Richtung (links) und z-Richtung (rechts)

werden<sup>15</sup>. Die eingangs erläuterte Abhängigkeit der Abweichungen bei der Lenkradeinstellung im virtuellen Fahrerplatzmodell von den Abweichungen im Augpunkt können nach wie vor gleichermaßen argumentiert werden. Die Anwender im virtuellen Fahrerplatzmodell richten sich das Lenkrad nach der Sichtbarkeit des Kombiinstrumentes in der virtuellen Umgebung ein. Befindet sich der in der Visualisierung dargestellte Augpunkt tiefer im Fahrzeug wird auch das Lenkrad tiefer eingestellt.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie deuten daraufhin, dass die aufgestellten Thesen zur gegenüber einem Realfahrzeug veränderten Sitzposition im virtuellen Fahrerplatzmodell nur bedingt zutreffen. Einerseits sind die ermittelten Abweichungen teilweise deutlich geringer als zunächst angenommen. Andererseits zeigt sich, dass die durch die mechanische Einschränkung des HMD verursachten Abweichungen auf die Sitzposition im Fahrzeug gering sind. Die trotzdem bestehenden Unterschiede sind nur zum Teil den physikalischen Gegebenheiten des Darstellungsmediums HMD zuzuschreiben. Dennoch zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die Anwender im virtuellen Fahrerplatzmodell sehr gut in der Lage sind im virtuellen Fahrerplatzmodell ihre jeweiligen Sitzpositionen aus einem entsprechenden Realfahrzeug, hier dargestellt durch Positionierungsdaten zu

<sup>15</sup>Die Untersuchung zeigt die Notwendigkeit einer möglichst genauen Kalibrierung des Trackingsystems und der verwendeten Marker. Gleichzeitig sollte über Positionierungsvorschriften ein möglichst reproduzierbare Ausrichtung des Displays auf dem Kopf des Anwenders sichergestellt werden. Diese Positionierungsvorschriften sind stark abhängig vom verwendeten HMD-Typ, beispielsweise kann aber die Winkelabhängigkeit der verwendeten Displays ausgenutzt werden. Die Anwender sehen beim in der vorliegenden Arbeit verwendeten HMD nur bei einer nahezu orthogonalen Ausrichtung ihres Sichtstrahls ein Bild ohne Verschattungen auf dem Display. Somit wird die reproduzierbare Positionierung des HMD realisiert.

### *3 Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells*

Augpunkt, Hüftpunkt und Lenkradeinstellung, zu reproduzieren.

## 3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells

Die in den vorangehenden Kapiteln vorgestellten Studien lassen sich als drei grundlegende Bausteine zur Evaluierung und Optimierung des Einsatzes eines virtuellen Fahrerplatzmodells für ergonomische Fragestellungen in frühen Phasen der Konzeptentwicklung einordnen. Diese Evaluierung dient vor allem dem Zweck das Untersuchungspotenzial des eingesetzten Werkzeugs zu analysieren und nachzuweisen. Auf Basis der ermittelten Erkenntnisse lassen sich im Laufe eines Entwicklungsprozesses auftretende ergonomische Problemstellungen optimal auf die zu Verfügung stehenden Untersuchungsmedien verteilen. Der Nachweis der Effizienz der Methodik „virtuelles Fahrerplatzmodell“ besteht aus drei Teilen:

- Die korrekte Größenwahrnehmung - Nehmen Anwender in der virtuellen Umgebung Elemente ebenso groß wahr, wie sie ihnen dargestellt werden?
- Die Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen - Mit welcher Zuverlässigkeit können ergonomische Fragestellungen in der virtuellen Umgebung bearbeitet werden?
- Die korrekte Sitzposition - Entspricht die Sitzposition in der virtuellen Umgebung der in einem realen Fahrzeug?

Ziel der Untersuchung zur Größenwahrnehmung im virtuellen Fahrerplatzmodell ist die Validierung der VR-Umgebung als Werkzeug mit subjektiv korrektem Größeneindruck. Als Untersuchungsmethode wird hierfür das Angleichen der Größe eines virtuellen Objekts an ein vorher gesehenes reales Referenzobjekt verwendet. Dabei prägen sich die Probanden die Größe eines realen Referenzobjekts ein und skalieren anschließend ein virtuelles Pendant auf die vorher eingeprägte Größe. Es zeigt sich, dass die subjektiv empfundene Größenwahrnehmung der theoretisch bestimmten Größendarstellung am besten entspricht, wenn die Nutzer-Wahrnehmung der VR-Umgebung durch ein möglichst hohes Maß an Selbstrepräsentation unterstützt wird. Bei rein visueller Nutzung der VR-Umgebung weisen die Ergebnisse des Experiments eine Unterschätzung von ca. 3-5% nach. Diese Wahrnehmungsverzerrungen im virtuellen Fahrerplatzmodell können durch eine Handrepräsentation des Nutzers signifikant auf eine Unterschätzung von 0,3% verringert werden. Die Kenntnis dieses Zusammenhangs stellt eine wichtige Basis für Innenraumbewertungen im VR-System dar. Die Repräsentation des Nutzers im virtuellen Fahrerplatzmodell spielt eine entscheidende Rolle zur korrekten Wahrnehmung in der VR-Umgebung. Das Optimierungspotential besteht aufgrund dieser Ergebnisse im weiteren Ausbau der Menschrepräsentation im virtuellen Fahrerplatzmodell auf die Visualisierung des kompletten menschlichen Körpers.

Mit den Untersuchungen ergonomischer Bewertungskriterien soll die Frage beantwortet werden, welche Untersuchungsaspekte zuverlässig in der virtuellen Umgebung bearbeitet werden können. Dazu wurden die Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit verschiedener Bedienelemente aus einem Fahrzeuginnenraum mit

Hilfe eines Untersuchungsansatzes aus der Signalentdeckungstheorie analysiert. Die eingesetzte Untersuchungsmethodik basiert im Wesentlichen auf der Auslegung eines Fahrzeuginnenraums mit ergonomischen Gestaltungsmängeln und einem Vergleich der Beurteilungsleistung in einem virtuellen und einem korrespondierenden realen Fahrzeuginnenraum. Dabei bedeutet eine gute Beurteilungsleistung das zuverlässige Identifizieren der Gestaltungsmängel und gleichzeitig eine ebenfalls zuverlässige korrekte Zurückweisung bei Beurteilungsobjekten ohne Gestaltungsmangel. Dazu wurden die Bedienelemente des Fahrzeuginnenraums kategorisiert. Der Untersuchungsumfang umfaßt 53 repräsentative Elemente aus dem Bereich des Fahrerarbeitsplatzes. Die dabei im rein visuell genutzten virtuellen Fahrerplatzmodells erzielbaren Beurteilungsleistungen bestätigen den Ansatz die Visualisierung des virtuellen Fahrerplatzmodells mit einem realen variablen Fahrerplatzmodell zu ergänzen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Fragestellungen zur Auffindbarkeit oder Sichtbarkeit von Elementen des Fahrerarbeitsplatzes keine signifikanten Unterschiede bezüglich der erzielbaren Beurteilungsleistung zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und einem realen Referenzmodell bestehen. Die Kennzahl für die Beurteilungsleistung im virtuellen Fahrerplatzmodell beträgt für das Bewertungskriterium Auffindbarkeit 98%. Für die Erreichbarkeit von Bedienelementen konnten signifikante Unterschiede in der Beurteilungsleistung festgestellt werden, diese sind unabhängig von der Elementart, allerdings abhängig von Anordnung und Lage des Elements. Als Hauptprobleme konnten hierbei Verdeckungen durch den eigenen Körper oder andere Elemente, die fehlende Kollisionsrückmeldung und die Stereoskopie im HMD identifiziert werden. Für die Erreichbarkeit wurde eine Kennzahl für die Beurteilungsleistung im virtuellen Fahrerplatzmodell von 85% ermittelt. Beim Untersuchungskriterium Bedienbarkeit konnten signifikante Unterschiede bei der Bewertung im rein visuell genutzten virtuellen Fahrerplatzmodell und einem realen Referenzfahrzeug unabhängig von der Elementart festgestellt werden. Es wurde hier in der virtuellen Umgebung eine Beurteilungsleistung von 53% erzielt. Als Hauptproblem konnten bei diesem Bewertungskriterium ebenfalls die fehlende Erkennung von Kollisionen und Durchdringungen sowie die stereoskopische Darstellung im HMD ausgemacht werden. Aus diesen Erkenntnissen läßt sich folgern: Für Untersuchungen zur Erreichbarkeit und Bedienbarkeit sollte das virtuelle Modell durch ein reales Modell ergänzt werden. Die Studie bestätigt damit den Ansatz des virtuellen und variablen Fahrerplatzmodells. Das virtuelle und variable Fahrerplatzmodell stellt damit ein Werkzeug dar, in dem ergonomische Auslegungsaspekte wie Sicht, Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit in einer frühen Konzeptphase bewertet werden können. Für Elemente, die nicht im variablen Modell vorhanden sind, wurde eine virtuelle Kollisionserkennung implementiert. Kollisionen zwischen realen Objekten und virtuellen Objekten können zusätzlich visuell durch ein Verfärben des virtuellen Objekts kenntlich gemacht werden. Diese Kollisionserkennung wurde in einer Studie zu den Entnahmebewegungen eines Bechers aus einer Aufnahme im Fahrzeuginnenraum in der virtuellen und realen Umgebung evaluiert.

Als letzter Schritt der Evaluierung wird die Positionierung des Nutzers im virtuellen Fahrerplatzmodell untersucht. Erst wenn sicher gestellt ist, dass zwischen der Sitzhaltung im virtuellen Modell und einem entsprechenden realen Referenzfahrzeug keine Unterschiede bestehen, können die in der virtuellen Umgebung getroffenen Bewertungen

### *3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Evaluierung des Virtuellen Fahrerplatzmodells*

auf die Realität 1:1 übertragen werden. Als Parameter für die Positionierung des Fahrers im Fahrzeug wurden die Koordinaten seines Hüftzentrums, seines Augpunkts und die Einstellung des Lenkrads herangezogen. In den Versuchsergebnissen zeigt sich, dass die durch ein HMD verursachten mechanischen Einschränkungen sowie die Einschränkungen des Sichtfelds durch das HMD keine nachweisbaren Auswirkungen auf die Positionierung des Anwenders im Fahrzeug haben. Die Reproduzierbarkeit der Sitzposition aus einem Realfahrzeug im virtuellen Fahrerplatzmodell kann als gegeben eingestuft werden.



## 4 Perzentilsimulation im Virtuellen Fahrerplatzmodell

Im folgenden Kapitel wird eine Weiterentwicklung des virtuellen Fahrerplatzmodells beschrieben, die sogenannte Perzentilsimulation. Darunter wird das Erleben eines Fahrzeuginnenraums aus der Perspektive eines beliebigen Körperperzentils<sup>1</sup> mit Hilfe der virtuellen Realität im virtuellen Fahrerplatzmodell verstanden. Damit wird ein zusätzlicher Mehrwert der virtuellen Simulation generiert.

Im heutigen Produktentstehungsprozess kommen zunehmend digitale Menschmodelle zum Einsatz. Zu diesem Zweck existieren in den eingesetzten Standardsoftwarewerkzeugen zur Produktentwicklung verschiedene Module, die ergonomische Analysen mit Hilfe dieser digitalen Menschmodelle ermöglichen. Spanner-Ulmer u. Mühlstedt (2009) definieren den Begriff digitale Menschmodelle als virtuelle Abbilder realer Menschen zur virtuellen Überprüfung virtuell entwickelter Ideen. Großer Vorteil dieser Modelle ist die Nutzung verschiedenster anthropometrischer Daten, wie Geschlecht, Perzentile, Populationen, Akzeleration und altersdifferenzierte Daten. Als Nachteile der digitalen Menschmodelle werden von Spanner-Ulmer u. Mühlstedt (2009) und Zhang u. Chaffin (2006) der hohe Zeitbedarf bei der Bearbeitung und teilweise hohe Schulungsbedarf genannt. Für den Einsatz als ergonomisches Analysewerkzeug kommen dabei zwei Kategorien von digitalen Menschmodellen in Betracht (Spanner-Ulmer u. Mühlstedt, 2009). Einerseits die arbeitswissenschaftlichen digitalen Menschmodelle mit den oben genannten Eigenschaften. Sie dienen vornehmlich dem Zweck der Sicht- und Erreichbarkeitsanalyse. Daneben gibt es eine Gruppe dynamischer bzw. biomechanischer Menschmodelle welche beispielsweise auch in VR-Systemen eingesetzt werden. In der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell wird ein solches biomechanisches digitales Menschmodell eingesetzt. Im Gegensatz zu einem arbeitswissenschaftlichen digitalen Menschmodell, dessen Hauptzweck in der Simulation einer bestimmten Population besteht, dient das in der Perzentilsimulation verwendete digitale Menschmodell vor allem dem Erleben der Simulation aus einer bestimmten Ego-Perspektive.

---

<sup>1</sup>Der Begriff Perzentil (lat. „Hundertstelwerte“) bezeichnet die Aufteilung einer Verteilung in einhundert gleich große Teile. In der Anthropometrie wird dieser Begriff häufig in Bezug auf die Körpergröße verwendet. So stellen das fünfte, das fünfzigste und das fünfundneunzigste Perzentil nicht selten wichtige Grenzwerte bei der ergonomischen Auslegung technischer Produkte dar. Die gesamten anthropometrischen Daten dieser im Bezug auf die Körpergröße kategorisierten Modelle sind in verschiedenen Datenbanken abgelegt. Der Begriff Perzentil und Körperperzentil wird in dieser Arbeit folglich als ein kompletter anthropometrischer Datensatz eines Körpers verstanden, der nach dem Perzentil der Körpergröße eingeordnet wird.

## 4.1 Theoretischer Ansatz

Ziel der Perzentilsimulation ist es, einen Anwender in die Perspektive eines beliebigen Körperperzentils hineinzusetzen und ihn einen virtuellen Fahrzeuginnenraum aus genau dieser Perspektive erleben zu lassen. Dabei bezieht sich der hier verwendete Begriff Körperperzentil ausdrücklich nicht nur auf ein einziges Maß, da ansonsten die Problematik unterschiedlicher individueller Proportionen außer acht bliebe. Unter einem Körperperzentil wird im Folgenden eine beliebige Kombination verschiedener Körperabmessungen verstanden, die einen Anwender anthropometrisch vollständig beschreiben. Hintergrund dazu ist die Tatsache, dass für die Auslegung verschiedener Aspekte im Fahrzeuginnenraum, beispielsweise die Erreichbarkeit von Bedienelementen in der Schalttafel, Mittelkonsole oder Türe bzw. die Sichtbarkeit verschiedener Anzeigen in der Schalttafel im Kombiinstrument oder die Sicht auf die Rückspiegel die 5%-Frau und der 95%-Mann als Auslegungsgrenzen herangezogen werden. Mittels der vorgestellten digitalen Menschmodelle lässt sich eine derartige ergonomische Auslegung und Analyse in den gängigen CAD-Werkzeugen erstellen. Allerdings haben definitionsgemäß die wenigsten Entwickler die Größe dieser Randperzentile. Daher müssen sie die Auslegung anhand der Analysefunktionen der digitalen Menschmodelle interpretieren und die richtigen Rückschlüsse ziehen. An dieser Stelle setzt die Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell an, sie versetzt den Anwender eben genau in die Perspektive eines bestimmten Randperzentils und läßt ihn die Situation in Echtzeit virtuell erleben. Damit ergänzt die Perzentilsimulation den konventionellen Einsatz digitaler Menschmodelle in der Arbeitswissenschaft, indem sie den Entwickler bei der Interpretation seiner Ergebnisse unterstützt. Desweiteren kann der Ansatz der Perzentilsimulation bei der Kommunikation arbeitswissenschaftlicher Analyseergebnisse an einen Personenkreis mit geringerer Erfahrung im Bezug auf die Fahrzeugergonomie sehr hilfreich sein und bei wichtigen Entwicklungsentscheidungen helfen.

Der theoretische Ansatz zur Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell basiert auf den folgenden grundsätzlichen Überlegungen und Untersuchungen. In ihren Studien zeigen Slater u. a. (2009), dass Probanden sowohl durch haptische Rückmeldung, als auch durch eine Interaktion in Echtzeit eine virtuelle Körperrepräsentation als ihren eigenen Körper empfinden. Diese Erkenntnisse basieren auf den Untersuchungen von Botvinick u. Cohen (1998) zur sogenannten „rubber hand illusion“. Darin wurde gezeigt, dass Probanden einen aus Gummi hergestellten „falschen“ Arm als ihren eigenen empfinden, wenn der für den Probanden nicht sichtbare reale Arm und der sichtbare falsche Arm gleichzeitig und synchron angetippt werden. Dieser Effekt setzt nach einigen Wiederholungen dieser synchronen visuellen und haptischen Stimulation ein und wird im Experiment neben einer entsprechenden Fragebogenauswertung auch durch die sogenannte „proprioceptive drift“ belegt. Botvinick u. Cohen (1998) messen dazu die Position an der die Probanden ihren Arm während des Effekts empfinden und vergleichen dies mit der realen Position ihres Armes<sup>2</sup>. In verschiedenen Studien wurde gezeigt, dass

---

<sup>2</sup>Vor der synchronen Stimulation des Arms zeigen die Probanden mit ihrer freien anderen Hand und dabei geschlossenen Augen die Position der Hand des untersuchten Arms an. Sie zeigen dabei auf die der Handmitte entsprechenden Stelle auf der Unterseite der Tischplatte, auf der sich ihr Arm

eine realistische Form des falschen Arms und dessen Ausrichtung analog zum realen Arm des Probanden die „rubber hand illusion“ verstärken (Slater u. a., 2009). Der beschriebene Effekt wird von Slater u. a. (2009) auf eine virtuelle Simulation des Arms übertragen. Abbildung 4.1 zeigt zum besseren Verständnis den entsprechenden Versuchsaufbau.

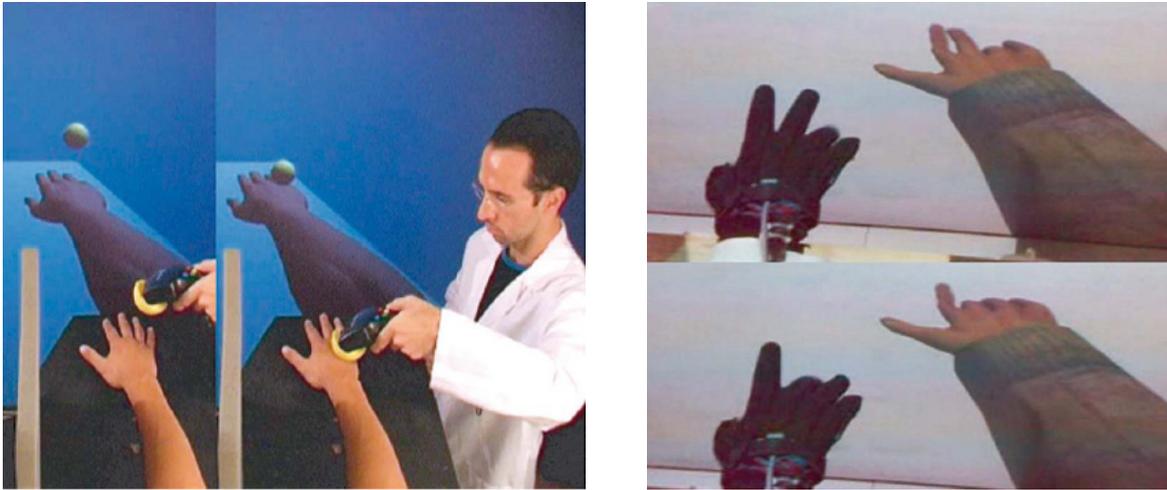


Abb. 4.1: Versuchsaufbau zur Übertragung des Effekts der „rubber hand illusion“ in eine virtuelle Umgebung (nach Slater u. a., 2009): synchrone visuelle und haptische Stimulation (links) und Synchronität der visuellen und motorischen Hand- und Fingerbewegung (rechts).

Abweichungen zwischen der empfundenen Position des virtuell simulierten „falschen“ Arms und des realen Arms des Probanden konnten von Slater u. a. (2009) analog zu den Untersuchungen von Botvinick u. Cohen (1998) nachgewiesen werden. Abbildung 4.1 (rechts) zeigt den Versuchsaufbau mit dem gezeigt wurde, dass die motorische Synchronität zwischen realer Handbewegung und visualisierter Handbewegung ebenfalls die Probanden den virtuell dargestellten Körper als ihren eigenen empfinden läßt. Die Finger- und Handbewegungen wurde dabei mittels Datenhandschuh in Echtzeit an die VR-Simulation übertragen. Die Ergebnisanalyse erfolgte hier ebenfalls per Fragebogen bzw. Auswertung der „proprioceptive drift“.

Slater u. a. (2009) folgern weiterhin aus ihren Ergebnissen, dass sich die gezeigten Effekt auf den ganzen Körper bzw. dessen virtuelle Darstellung übertragen lassen. Dabei stellen sie fest, dass ein hoher Realitätsgrad der Visualisierung keine Voraussetzung dafür ist den virtuellen Körper als den eigenen zu empfinden. Sie machen diese Behauptung an verschiedenen untersuchten Abstraktionsgraden von Körpervisualisierungen bzw. einer Darstellung mit und ohne Körperschattendarstellung in der virtuellen Umgebung fest. Petkova u. Ehrsson (2008) geben in ihren Studien Hinweise, die ebenfalls den Rückschluß zulassen, dass sich der Effekt der virtuellen „rubber hand illusion“ auf den ganzen Körper

---

befindet. Nach der Stimulation wird dieser Vorgang wiederholt. Der Abstand zwischen den beiden Positionen wird als „proprioceptive drift“ bezeichnet.

übertragen läßt. In ihrer Untersuchung wurde eine Videokamera am Kopf eines Assistenten befestigt, der nach unten auf seinen eigenen Körper blickt. Dieses Videosignal wurde in das HMD der Versuchspersonen übertragen, die ebenfalls aufgefordert waren an sich selbst herunter zu blicken. Ein synchrones Antippen des Bauches des Assistenten und der Versuchsperson resultierte in einem starken Empfinden der Versuchsteilnehmer den visuell wahrgenommenen Körper als ihren eigenen zu wahrzunehmen.

In weiterführenden Studien zeigen Slater u. a. (2010), dass die Körper selbstwahrnehmung nicht ausschließlich an den eigenen Körper gebunden ist. Unter bestimmten Voraussetzung akzeptiert der Mensch auch einen anderen Körper als seinen eigenen. Slater u. a. (2010) veranschaulichen dies in ihrer Untersuchung zu 3D-Avataren in immersiven VR-Umgebungen. Dabei versetzen sie die Probanden (Männer im Alter von 20-30 Jahren) mittels HMD in eine virtuelle Umgebung und lassen sie die virtuelle Umgebung aus der Perspektive eines zehnjährigen Mädchens erleben. Die Probanden befinden sich in einem virtuellen Wohnzimmer, wenn sie umher blicken, sehen sie im Spiegel sich selbst im Körper des jungen Mädchens. Im virtuellen Zimmer befindet sich ebenfalls eine erwachsenen Frau. Im Laufe des Experiments geht diese virtuelle Frau auf das Mädchen zu und streichelt es auf der Schulter. Gleichzeitig ahmt ein Assistent diese Berührung in Realität bei der Testperson nach um das Gefühl der Körperidentifikation bei den Probanden zu erhöhen. Plötzlich schlägt die Frau dem Mädchen in Form einer virtuellen Ohrfeige ins Gesicht, d.h. es erfolgt keine reale Berührung. Slater u. a. (2010) stellen fest, dass die Probanden sich unter bestimmten Voraussetzungen in das junge Mädchen bzw. die Darstellung in der virtuellen Umgebung hineinversetzen und die typischen Ausweichreaktionen zeigen, obwohl keine reale Berührung stattfindet: Die Probanden weichen reflexartig mit ihrem Kopf aus und schnappen nach Luft. Es wurden Messungen der elektrischen Leitfähigkeit der Haut und der Herzfrequenz aufgenommen. Damit werden Stressempfindungen bzw. Schmerz, Angst oder eine Vermeidungsreaktion auslösende Empfindungen physiologisch messbar und objektiv beurteilbar. Die Autoren nennen drei Faktoren, die dazu führen, dass sich die Probanden in den virtuell dargestellten Körper hineinversetzen: die Egoperspektive, also das Erleben der virtuellen Szene aus der Perspektive des virtuellen Ichs, die immersive Interaktion mit der virtuellen Umgebung in Echtzeit und die haptische Rückmeldung in der virtuellen Simulation. Belegt wird dies mit signifikanten Unterschieden in subjektiven, per Fragebogen ermittelten, und oben beschriebenen physiologischen Messwerten der Probanden. Im Versuchsaufbau haben die Probanden dabei die virtuelle Szene entweder aus der Egoperspektive oder einer Außenperspektive wahrgenommen. Weitere Variablen im Versuchsablauf war die Interaktion mit der Umgebung (freie Bewegung in Echtzeit bzw. vorgegebene Bewegung) und die haptische Rückmeldung zur Steigerung der Körperidentifikation (Streicheln der Schulter durch den Assistenten in Realität bzw. keine reale Berührung).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass es in virtuellen Umgebungen unter Einsatz visueller und haptischer Stimuli möglich ist, Anwender in einen virtuellen Körper hineinzuversetzen, den sie als ihren eigenen Körper wahrnehmen bzw. akzeptieren. Auf diesem Ansatz basiert die Grundidee der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell: einen virtuellen Fahrzeuginnenraum aus der Perspektive einer beliebigen anderen Person wahrzunehmen.

### Perzentil-Simulation

"Den Fahrzeuginnenraum mittels virtueller Realität  
aus der Perspektive eines beliebigen Perzentils erleben."

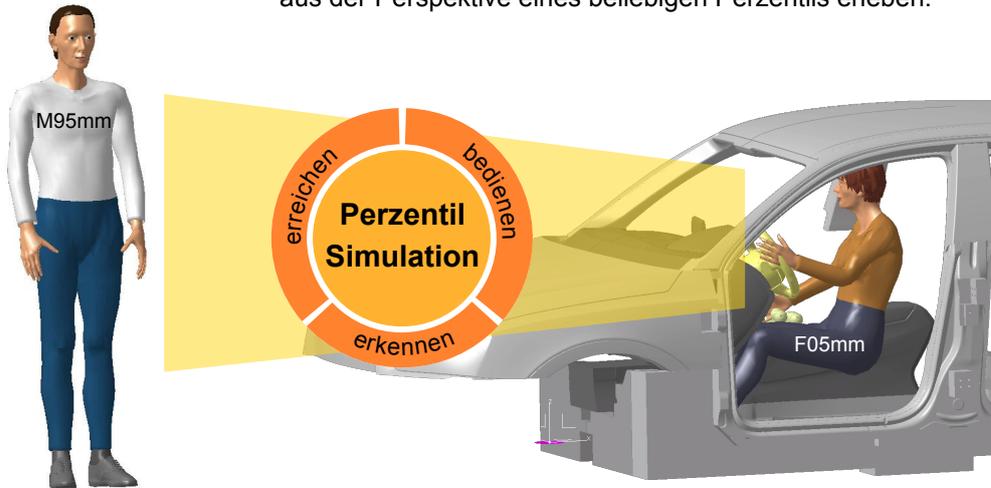


Abb. 4.2: Ausgangssituation der Perzentilsimulation: exemplarisch dargestellt mit dem Ausgangsperzentil M95mm und dem Zielperzentil F05mm (M95mm erlebt den Fahrzeuginnenraum aus der Perspektive der F05mm)

Dabei sind Ausgangs- und Zielperzentil grundsätzlich frei wählbar. Unter Ausgangsperzentil wird in diesem Zusammenhang das Körperperzentil des Anwenders verstanden, das Zielperzentil entspricht dem Körperperzentil des simulierten Menschen. Abbildung 4.2 veranschaulicht die Ausgangssituation exemplarisch für ein Ausgangsperzentil M95mm<sup>3</sup> und ein Zielperzentil F05mm.

<sup>3</sup>M95mm bezeichnet an dieser Stelle einen Mann mit 95. Körperhöhenperzentil, mittlerer Stammlänge und mittlerer Korpulenz, dementsprechend stellt die Abkürzung F05mm eine Frau des 5. Körperhöhenperzentils dar, ebenfalls mit mittlerer Stammlänge und mittlerer Korpulenz

## 4.2 Umsetzung im Virtuellen Fahrerplatzmodell

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie sich die Idee der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell konkret umsetzen lässt. Dazu wird die Simulation für ein bestehendes Fahrzeugprojekt und definierte Ausgangs- und Zielperzentile aufgebaut, um sie im nächsten Schritt evaluieren zu können. Die gesamte Perzentilsimulation setzt sich aus drei Teilbereichen zusammen (vgl. Abbildung 4.3). Ergonomische Analysen lassen sich im Falle der Produktergonomie eines Fahrzeuginnenraums in die drei Bereiche „Erkennen“, „Erreichen“ und „Bedienen“ aufteilen, diese entsprechen in etwa den Teilbereichen der Perzentilsimulation. Der erste Simulationsbereich befaßt sich mit der visuellen Simulation, d.h. die Verschiebung der Augpunkte des Anwenders in die Lage der Augpunkte des Zielperzentils. Hauptbestandteil des zweiten Simulationsbereiches ist das biometrische digitale Menschmodell, insbesondere dessen Größe und die Übertragung der Bewegungen des Anwenders. Schließlich vervollständigt der dritte Simulationsbereich, die haptische Rückmeldung durch entsprechend positionierte Elemente des variablen Fahrerplatzmodells, das Gesamtsystem Perzentilsimulation.

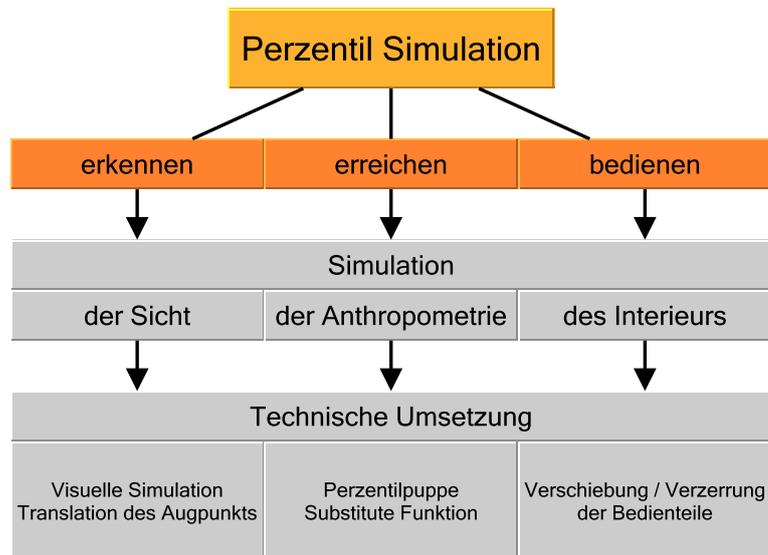


Abb. 4.3: Teilbereiche der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell

## Visuelle Simulation

Der visuelle Anteil der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell ermöglicht es dem Anwender die virtuelle Umgebung aus den Augen des Zielperzentils zu sehen. Im virtuellen Fahrerplatzmodell ist der Überlagerungspunkt für das darzustellende virtuelle Modell immer der durch die Pedalerie vorgegebene Ferspunkt. Dieser grundlegende Zusammenhang gilt auch für die Perzentilsimulation. Zunächst wird ein digitales Modell des Zielperzentils im CAD-Modell des Fahrzeugs positioniert. Die Positionierungsvorschriften entsprechen dabei dem Vorgehen im konventionellen Entwicklungsprozess. Die Positionierung erfolgte in der exemplarischen Anwendung der Perzentilsimulation über folgende Bedingungen: der Ferspunkt steht auf dem Teppich im Fußraum auf und der rechte Fuß betätigt das Gaspedal in 1/3-Stellung, der Hüftpunkt befindet sich im Sitzverstellfeld und die Hände umgreifen das Lenkrad in 10- bzw. 14-Uhr-Stellung. Durch diese Positionierung ergeben sich die Augpunktkoordinaten des Zielperzentils.

Je nach Körpergröße des Anwenders kommt es zu einer Abweichung der Augpunktkoordinaten zwischen Anwender und Zielperzentil (vgl. hierzu Abbildung 4.4). Diese Abweichung wird mittels translatorischer Verschiebung ausgeglichen. Zur Vereinfachung des Zusammenhangs wird für die notwendige translatorische Verschiebung das Mittenaugen als Augpunkt betrachtet. Der Betrag dieser Verschiebung berechnet sich aus den Koordinaten des Augpunkts des Zielperzentils und der durch das Trackingsystem gemessenen Positionierung des Augpunkts des Anwenders. Um diesen Betrag bestimmen zu können, begibt sich der Anwender in die durch die Einstellung des variablen Fahrerplatzmodells vorgegebene Ausgangshaltung, diese wird in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. In dieser Ausgangsposition wird der Betrag der Abweichung bestimmt und als fester Offset auf die Trackingkoordinaten des Augpunkts des Anwenders in der virtuellen Simulation addiert. Damit kann sich der Anwender weiter wie gewohnt im virtuellen Modell frei umsehen, die Visualisierung der virtuellen Umgebung wird in Echtzeit angepasst.

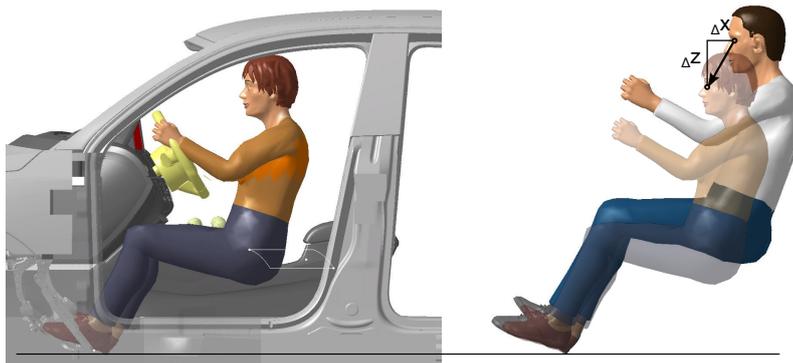


Abb. 4.4: Visuelle Simulation: Der Unterschied der Koordinaten des Augpunkts zwischen Anwender und Zielperzentil wird als fester Offset zu den Trackingkoordinaten addiert

## Perzentilpuppe

Der zweite Simulationsbereich befasst sich mit der Anthropometrie von Nutzer und Zielperzentil und dient dazu dem Anwender das Gefühl zu geben, sich im Körper des Zielperzentils zu befinden. Analog zu den eingangs dargestellten Grundüberlegungen stellt dieser Teil der Simulation die visuelle Basis für die Körperselbstwahrnehmung des Anwenders im digitalen Menschmodell des Zielperzentils dar. Die realen Bewegungen des Nutzers werden auf eine Perzentilpuppe in der VR-Umgebung übertragen. Diese Perzentilpuppe entspricht dabei exakt den anthropometrischen Dimensionen des Zielperzentils. Die Überlagerung basiert auf einer Übertragung der Gelenkwinkel mit ihren jeweiligen Freiheitsgraden auf das digitale Menschmodell des Zielperzentils. Abbildung 4.5 veranschaulicht diese Übertragung der Körperhaltung in Echtzeit schematisch.



Abb. 4.5: Perzentilpuppe: Die Körperhaltung und Bewegungen des Anwenders werden in Echtzeit auf das virtuelle Körpermodell des Zielperzentils übertragen.

Dabei kann grundsätzlich auf die Bewegungsübertragung des im virtuellen Fahrerplatzmodell eingesetzten digitalen Menschmodell zurückgegriffen werden. Dies bedeutet, dass mittels am Körper des Anwenders angebrachter Trackingtargets seine Bewegungen registriert werden und auf das digitale biometrische und dynamische Modell in der virtuellen Umgebung übertragen werden. Nicht erfasste Gelenke oder Extremitäten werden dabei durch ein integriertes Bewegungsmodell in Echtzeit berechnet. Im in der virtuellen Umgebung eingesetzten Menschmodell wird dieses Ersetzen des steuernden Kinematikmodells durch ein entsprechendes Modell in der Größe des Anwenders auch als Substitute-Funktion bezeichnet. Diese Funktionalität basiert im Wesentlichen auf einer Erfassung der Körperhaltung des Anwenders über das Trackingsystem und der Übertragung auf das virtuelle Körpermodell des Zielperzentils. Die Körperhaltung ist definiert durch die Abstände zwischen den einzelnen Gelenkpunkten, also z.B. die Länge der Extremitäten und der entsprechenden Winkel an den Gelenken. Diese Winkel wer-

den aus der Körperhaltung des Anwenders ermittelt und auf das virtuelle Körpermodell des Zielperzentils übertragen. Die Überlagerung des steuernden Körpermodells mit dem gesteuerten virtuellen Körpermodell erfolgt wiederum am durch die Pedalerie vorgegebenen Ferspunkt. Die Kompensation der Unterschiede der translatorischen Abweichungen in den Trackingkoordinaten der einzelnen am Körper des Anwenders angebrachten Marker erfolgt durch die Substitute-Funktionalität. Damit wird das virtuelle Körpermodell exakt von der Körperhaltung des Anwenders gesteuert. Die Bewegungen des Anwenders werden in Echtzeit auf das virtuelle Körpermodell übertragen.

### **Verschiebung und Verzerrung der Bedienelemente**

Dritter Bestandteil der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell ist die haptische Simulation des Interieurs. Dies geschieht analog zur konventionellen Anwendung des virtuellen Fahrerplatzmodells mit der entsprechenden Einstellung der Bedienkomponenten des variablen Fahrerplatzmodells. Allerdings kann an dieser Stelle nicht die normale an die CAD-Daten des entsprechenden Fahrzeugprojekts angepasste Einstellung des variablen Fahrerplatzmodells verwendet werden. Visuelle und haptische Informationen müssen für den Anwender zusammenpassen. Das bedeutet, sie müssen sich analog zur konventionellen Anwendung möglichst exakt überlagern. Sieht der Anwender in der virtuellen Umgebung, dass er ein bestimmtes Bedienelement mit seiner Hand berührt, muss genau an dieser Position die entsprechende haptische Rückmeldung durch das variable Fahrerplatzmodell erfolgen (vgl. hierzu die eingangs zitierten Studien u.a. von Slater u. a. (2010)). Dies ist eine weitere zentrale Anforderung, damit der Anwender das virtuelle Körpermodell als seinen eigenen Körper empfindet. Es kommt daher zu einer Verschiebung und Verzerrung der Bedienteile im variablen Modell. Abbildung 4.6 zeigt diese Verschiebung und Verzerrung anhand der Positionierung des Sitzverstellfelds und der Positionierung des Lenkrads.

Die Berechnung der Verschiebung und Verzerrung erfolgt auf Basis der Körperhaltung des positionierten Zielperzentils (vgl. die Positionierungsvorschriften im vorangehenden Abschnitt). Die statische Körperhaltung des Zielperzentils wird auf ein statisches Körpermodell des Ausgangsperzentils übertragen. Das in der jeweiligen Situation bzw. Bedienaufgabe untersuchte Bedienelement wird an den entsprechenden Berührungspunkten des Ausgangsperzentils durch die Übertragung der Körperhaltung an seine neue Position verschoben. Für die in Abbildung 4.6 exemplarisch dargestellte Situation bedeutet dies, dass das Ausgangsperzentil (M95mm) den Sitz am Berührungspunkt Hüftpunkt-Sitzpunkt<sup>4</sup> in seine für die Perzentilsimulation richtige Lage verschiebt. Analog wird beim Lenkrad verfahren, hier kommt allerdings auch der Effekt der Verzerrung zu tragen. Es ist leicht nachvollziehbar, dass sich der Abstand der Berührungspunkte Lenkrad-Handinnenflächen des Ausgangsperzentils im Vergleich zum Zielperzentil auch in y-Richtung verändert. Dies ist mit einer Veränderung des Lenkraddurchmessers gleichzusetzen und wird unter anderem durch die Unterschiede der beiden Perzentile in Schulterbreite und Länge der

---

<sup>4</sup>Die Lage des Sitzpunktes im Sitzverstellfeld entspricht der vorher ermittelten Einstellung des Zielperzentils bei der Positionierung. In der exemplarisch dargestellten Situation entspricht dies der Sitzeinstellung vorne oben.

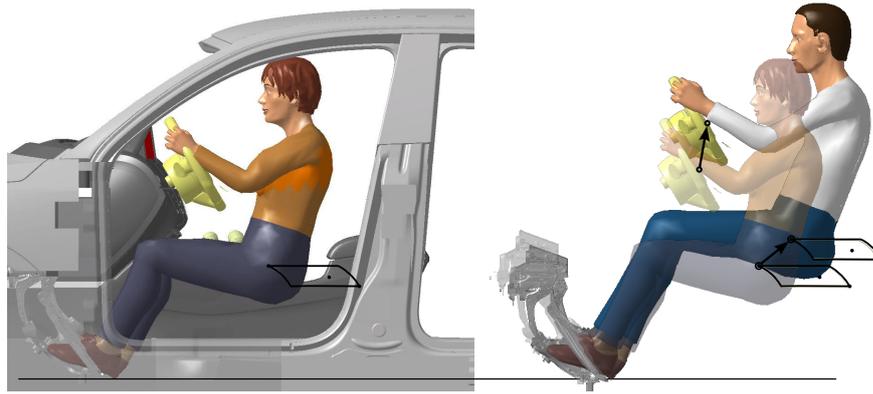


Abb. 4.6: Verschiebung der Bedienteile: Die Überlagerung visueller und haptischer Informationen bedingt eine Verschiebung der Bedienteile im variablen Fahrerplatzmodell. Rechts: Das Zielperzentil ist hier transparent dargestellt, die sich ergebende Verschiebung der Bauteile und das Körperperzentil des Anwenders sind intransparent dargestellt.

Extremitäten verursacht. Derselbe Zusammenhang läßt sich auch auf den Durchmesser des Lenkradkranzes anwenden. Die Veränderung des Lenkradkranzdurchmessers ist auf die unterschiedliche Handgröße zwischen Ausgangs- und Zielperzentil zurückzuführen. Es kommt also zu Verschiebungen und Verzerrungen der einzelnen Bedienteile. Die Perzentilsimulation kann aber nicht nur auf die in Abbildung 4.6 exemplarisch gezeigte Fahrhaltung angewendet werden. Die gezeigte Methode zur Ermittlung von Verschiebung und Verzerrung der Elemente zur haptischen Rückmeldung ist prinzipiell auf alle Elemente des Fahrzeuginnenraums anwendbar. Es muss hierzu die jeweils Körperhaltung des Zielperzentils eingestellt werden und auf das Ausgangsperzentil übertragen werden.

Der Vorteil dieser Methode besteht unter anderem darin, dass die originalen Daten des Fahrzeuginnenraums zur Visualisierung verwendet werden können. Die visuelle Darstellung der Daten erfolgt ohne jegliche Verzerrung. Die Darstellung des haptischen Feedbacks kann allerdings nicht in einem realen 1:1-Modell dieser Daten erfolgen, hier muss ein sehr variabel einstellbares Modell verwendet werden, in diesem Fall das variable Fahrerplatzmodell. Nur dann kann eine exakte Überlagerung der visuellen und haptischen Daten in der Perzentilsimulation dargestellt werden.

### 4.3 Evaluierung der Perzentilsimulation

Nachdem im vorangehenden Abschnitt die Theorie beschrieben wurde, auf der die Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell beruht, soll im Folgenden das Vorgehen zur Validierung dieser Erweiterung des virtuellen Fahrerplatzmodells vorgestellt werden.

In den eingangs zitierten Studien werden zur Evaluierung der Körperwahrnehmung eines digitalen Körpermodells drei unterschiedliche methodische Ansätze verwendet. Einerseits untersuchen Slater u. a. (2010) die physiologischen Messwerte der Probanden. So messen sie beispielsweise, ob sich in bestimmten Situationen ein zur realen Umgebung entsprechendes Niveau an Stress einstellt. Für die Perzentilsimulation ist dieser Ansatz nur schwer umsetzbar. Grundsätzlich soll in der Perzentilsimulation das Fahrzeuginterieur aus der Perspektive eines anderen Perzentils erlebbar gemacht werden. Dieses Erleben zeichnet sich nicht durch das Auftreten besonderer Stressniveaus oder ähnlicher physiologisch messbarer Kennwerte aus. Der zweite in den zitierten Studien angewandte Evaluierungsansatz basiert auf der Auswertung der sogenannten „proprioceptive drift“, also der Wahrnehmungsverschiebung. Am Beispiel des virtuellen „rubber arm“-Experiments lässt sich dies, wie dargestellt, sehr gut umsetzen. In der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell wird allerdings im Gegensatz zu diesem Evaluierungsansatz das komplette digitale Körpermodell direkt durch den Anwender bewegt bzw. gesteuert. Das bedeutet das Zeigen auf die Position der einen Hand mit der anderen funktioniert in der ursprünglichen Idee der Perzentilsimulation nicht, es müsste beispielsweise der zeigende Arm ausgeblendet werden. Dies verändert allerdings das zu evaluierende digitale Körpermodell grundlegend. Es würde nur ein sich halbseitig nicht bewegendes Körpermodell evaluiert werden. Der zweite Punkt der diesen Ansatz nur schwer umsetzbar gestaltet, ist die räumliche Barriere die zwischen den beiden Extremitäten aufgebaut werden muss. Sobald der Anwender mit seiner zeigenden Hand einen Teil seines Körpers berührt, kann er sich anhand dieser haptischen Information zu seinem Ziel „vortasten“. Dies bedeutet im Umkehrschluß, dass die Bewegungsfreiheit des Anwenders für diese Evaluierungsmethodik deutlich eingeschränkt werden müsste. Damit wird wiederum nicht der eigentliche Ansatz der Perzentilsimulation evaluiert, der ja gerade auf diesem freien Erleben des Fahrzeuginterieurs basiert. Ein dritter möglicher Evaluierungsansatz beruht auf der Analyse des subjektiven Empfinden der Probanden mittels Fragebogen.

Für die vorliegende Arbeit wurde daher auf Basis dieser Erkenntnisse das folgende Vorgehen zur Validierung der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell entwickelt. Die Validierung beruht auf drei Ansatzpunkten: die Anwender sollen die Perzentilsimulation erleben, auf anthropometrische Probleme des Zielperzentils sensibilisiert werden und die erlebten Probleme objektiv schildern bzw. danach eine subjektive Einschätzung über den Unterstützungsgrad der Simulation abgeben. Für die Evaluierungsstudie wird das Ausgangsperzentil M50mm und das Zielperzentil F05mm festgelegt. Daraus wird die spezifische Einstellung des variablen Fahrerplatzmodells abgeleitet. Folgende Elemente des Fahrzeuginterieurs werden im Versuchsaufbau zusätzlich zur Simulation von Sitz- und Lenkradlage betrachtet und im Sinne der Perzentilsimulation implementiert: das zentrale Bedienelement zur Radiobedienung, der Lichtdrehesalter

(LDS), die Schaltung, der Türzuziehgriff (TZZG), die Türinnenbetätigung (TIB), die Fensterheberschalter (FH), der Handschuhkastenöffner (HSK), die Bedienung der Becherhalters (Cups) und ein Bedienelement der Klimaanlage. Abbildung 4.7 zeigt einige verschobenen Bedienelemente des Versuchsaufbaus im Vergleich zu den originalen Positionen.



Abb. 4.7: Versuchsaufbau zur Evaluierung der Perzentilsimulation: Verschiebung der Bedienelemente Lenkrad, Schaltknauf und Radiobedienelement bezogen auf das Ausgangsperzentil (blau dargestellt). Die übrigen verschobenen Elemente des Versuchsaufbaus sind in dieser Ansicht verdeckt.

Die Probanden ( $n=25$ ) erleben zunächst die Perzentilsimulation, d.h. sie bekommen die benötigten Trackingtargets angelegt und das HMD zur Visualisierung aufgesetzt. Zu Beginn des Versuchs wird kurz der theoretischen Hintergrund der Perzentilsimulation erläutert. Im Anschluß erfolgt eine offene Befragung bei der die Probanden erste Eindrücke aus dem Erleben der Simulation schildern sollen: „Welche Probleme erleben Sie im Bezug auf Auffindbarkeit, Erreichbarkeit oder Bedienbarkeit mit den Bedienelementen des dargestellten Fahrzeugs?“. Die Antworten der Probanden werden dokumentiert. Danach erfolgt eine gezielte Befragung. Es wird explizit nach Problemen hinsichtlich Auffindbarkeit, Erreichbarkeit oder Bedienbarkeit der Bedienelemente gefragt, dabei werden nacheinander alle umgesetzten Bedienelemente abgearbeitet. Die Kritikalität der Probleme wird zusätzlich sowohl in der offenen als auch bei der geschlossenen Befragung in Form einer Schulnotenbewertung von den Probanden abgefragt. Dabei entspricht die Note 6 einer sehr hohen Kritikalität also großen Problemen bei der Auffindbarkeit, Erreichbarkeit oder Bedienbarkeit. Eine Bewertung mit der Note 1 bedeutet keine Probleme aus ergonomischer Sicht. Die Antworten der Probanden werden dokumentiert. Zum Abschluß

der Untersuchung erfolgt eine Befragung zum subjektiven Unterstützungspotenzial und zum Immersionempfinden analog zu den übrigen durchgeführten Studien dieser Arbeit. Der Fragebogen sowie die detaillierte Auswertung sind im Anhang D.3 zu finden.

Es ist offensichtlich, dass die von den Versuchsteilnehmern empfundene Kritikalität nicht direkt der empfundenen Kritikalität realer Personen des simulierten Zielperzents entspricht. Neben individuellen Unterschieden bei derartigen subjektiven Einschätzungen des direkten Erlebens sind hier auch Aspekte wie Lern- oder Gewohnheitseffekte anzuführen. So empfindet etwa eine kleine Person die täglich erlebten Einschränkungen beim Gebrauch für sie nicht im ergonomischen Sinne optimal ausgelegter technischer Gegenstände nicht im gleichen Maße negativ, wie ein durch die Perzentilsimulation in diese Perspektive versetzte Person, da die kleine Person diese Einschränkungen aus ihrem alltäglichen Erleben gewohnt ist, bzw. gelernt hat mit ihnen umzugehen. Dies gilt grundsätzlich für jede beliebige Kombination von Ausgangs- und Zielperzentil in der Perzentilsimulation. Trotzdem können die Anwender der Perzentilsimulation für die anthropometrischen Probleme des Zielperzents sensibilisiert werden, indem sie diese einfach erleben. Allerdings muss man bei der Interpretation der durch die Perzentilsimulation subjektiv erlebten anderen Perspektive beachten, dass hier beim Anwender eine gewisse Unschärfe bei der Einordnung der Ergebnisse, etwa der empfundenen Kritikalität ergonomischer Probleme besteht. Diesem Zusammenhang wird bei der Auswertung der im Versuchsaufbau ermittelten Bewertungen der einzelnen Bediensituationen Rechnung getragen. Dazu wird die Einteilung der Notenskala nochmals abstrahiert: ab einer Schulnote von 3 oder schlechter wird die jeweilige Bediensituation als für die Probanden kritisch eingeordnet. Über die gesamte Stichprobe kann somit der jeweilige Anteil der kritischen Einschätzungen eines Bedienelements ermittelt werden. Um die Validität der in der Perzentilsimulation ermittelten Ergebnisse zu untersuchen, werden die errechneten Anteile mit einer objektiven ergonomischen Bewertungsmethode verglichen. Eine hierfür geeignete Methodik stellt die u.a. von van der Meulen u. Speyer (2008) beschriebene Ramsis Diskomfort Analyse dar. Dieses im digitalen Menschmodell Ramsis integrierte Modul bewertet den statischen Diskomfort<sup>5</sup> einer Körperhaltung gegenüber z.B. einer neutralen Fahrhaltung. Die Analysemethode bietet dabei sowohl Diskomfortbewertungen einzelner Körperteile als auch eine Gesamtbewertung der kompletten Körperhaltung. Mit Hilfe dieser Analysemethode kann eine allgemeine ergonomische Einschätzung und Bewertung der Körperhaltung des Zielperzents durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Analyse in Form der Diskomfortbewertung der entsprechenden Körperhaltung kann nun mit den Ergebnissen des Versuchsaufbaus verglichen werden. Dazu wird die achtstufige Diskomfortskala in eine Prozentskala umgerechnet. Eine Diskomfortbewertung der Stufe 8 entspricht dabei einem Wert von 100%. Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse der

---

<sup>5</sup>Das zweidimensionale Komfort-Diskomfort-Modell von Zhang u. a. (1996) ordnet dem Begriff Komfort im Wesentlichen Aspekte des Gefallens zu. Danach lässt sich der Diskomfort einer Körperhaltung über messbare physikalische Eigenschaften wie Muskelanspannung, Gelenkhaltungen, Ermüdung, Störungen des Blutkreislaufs oder Schmerzen beschreiben. Da Aspekte des Gefallens für eine Objektivierung durch physikalische Messwerte nicht geeignet erscheinen und Komfort nur entstehen kann wenn nur ein begrenztes Maß an Diskomfort vorliegt, wird der Fokus in vielen Untersuchungen auf den Diskomfort als wesentlichen Untersuchungsgegenstand gelegt (vgl. z.B. Hartung, 2006).

Validierung der Perzentilsimulation im virtuellen Fahrerplatzmodell und die jeweiligen Bewertungen der Körperhaltungen des Zielperzentils mit der Ramsis Diskomfort Analyse, umgerechnet in eine Prozentskala.

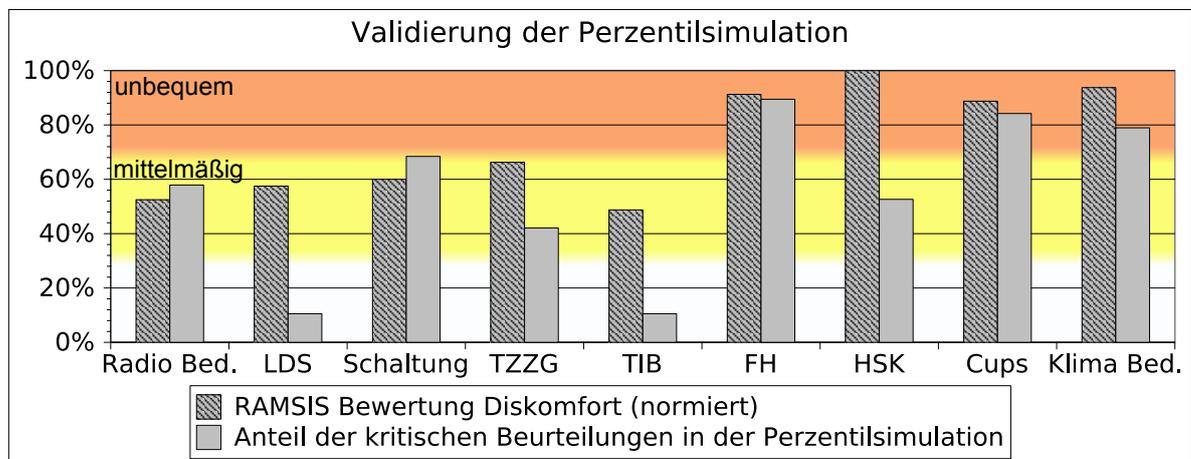


Abb. 4.8: Ergebnis der Evaluierung: Darstellung Ramsis Diskomfort und Einschätzung der Probanden

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind in Abbildung 4.8 Kategorien zur Interpretation der Ramsis Diskomfort Analyse eingetragen. Danach wird ein Diskomfortwert bis 2,5 als vertretbar, ab 2,5 bis 5 als mittelmäßig und über 5,5 als unbequem kategorisiert (achtstufige Ramsis Diskomfortskala). Diese Kategorisierung wird nun auf die beschriebene Prozentskala umgerechnet und für die Versuchsauswertung angewendet. Die Bewertungen der Körperhaltungen aus der Ramsis Diskomfort Analyse werden mit den Aussagen der Probanden hinsichtlich der Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit verglichen. Alle drei Bewertungskriterien haben einen Einfluß auf die Körperhaltung zur Erfüllung der entsprechenden Bedienungsaufgabe. Im Versuchsaufbau ist beispielsweise der Lichtdreheschalter für das Zielperzentil halb verdeckt. Um den Lichtdreheschalter komplett zu sehen, muss in der Simulation folglich die Körperhaltung vom Anwender angepasst werden. Das Beispiel zeigt, dass auch das Bewertungskriterium Auffindbarkeit in den Vergleich zur Ramsis Diskomfort Bewertung mit einbezogen werden kann (vgl. hierzu auch die Ausführungen in den folgenden Abschnitten).

Analysiert man nun die in der Evaluierungsstudie ermittelten Ergebnisse aus der Perzentilsimulation und die Ergebnisse der ergonomischen Bewertungsmethode Ramsis Diskomfort fällt auf, dass der Großteil der untersuchten Bedienelemente in beiden Ansätzen gleich kategorisiert wird.

Dies gilt für die Radiobedienung, die Schaltung und den Türzuziehgriff. Alle diese Elemente fallen nach dieser Auswertemethodik in die gleiche Kategorie. Die subjektive Interpretation dieser Ergebnisse scheint schlüssig, da sich die drei genannten Elemente jeweils seitlich neben dem Fahrer befinden. Die x-Position von Türzuziehgriff und Schalungslage sind in etwa gleich, daher resultieren nahezu an der Körpermitte gespiegelte

Körperhaltungen. Das Bedienelement zur Radiobedienung befindet sich etwas weiter vorne auf der Schalttafel, der Arm des Anwenders ist daher weiter nach vorne gestreckt.

Es fällt weiterhin auf, dass der Lichtdreheschalter von den Probanden in der Perzentilsimulation deutlich weniger kritisch eingeschätzt wird, als dies aus der Analyse der Ramsis Diskomfortbewertung hervorgeht. Das Radiobedienelement und der Lichtdreheschalter sind zur Sitzspur fast symmetrisch angeordnet, daraus ergeben sich ebenfalls nahezu an der Körpermitte gespiegelte Körperhaltungen. Dies lässt sich auch sehr einfach an der nahezu gleichen Einstufung des Ramsis Diskomforts dieser beiden Elemente in Abbildung 4.8 nachvollziehen. Um zu erklären, warum das subjektive Urteil der Probanden für den Lichtdreheschalter dennoch deutlich positiver ausfällt, muss folgender Zusammenhang berücksichtigt werden: Der Lichtdreheschalter befindet sich deutlich innerhalb des Erreichbarkeitsraums<sup>6</sup> des Zielperzentils, allerdings wird der Lichtdreheschalter vom Zielperzentil nicht direkt gesehen, der Lenkradkranz verdeckt den Drehknebel des Lichtdreheschalters zu einem großen Teil. Dies wird von den Probanden selbst in der Untersuchung zwar explizit angesprochen, allerdings nicht kritisch bewertet. Der Lichtdreheschalter befindet sich für sie an einer gewohnten Position und kann durch die deutliche haptische Differenzierung des Drehknebels von übrigen Bedienelementen auch blind, d.h. ohne direkten Sichtkontakt, bedient werden. Berücksichtigt man dies in der Körperhaltungsanalyse, verbessert sich die Diskomfortbewertung leicht. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse in der Darstellung Abbildung 4.8 beizubehalten, wird diese veränderte Körperhaltung (Bedienung ohne Blickkontakt zum Bedienelement) jedoch in der Abbildung nicht dargestellt. Dennoch besteht hier weiterhin ein Unterschied zwischen Diskomfortanalyse und subjektiver Bewertung in der Perzentilsimulation.

Auch bei der subjektiven Bewertung der Türinnenbetätigung fallen die Probanden ein gegenüber der Ramsis Diskomfort Analyse deutlich weniger kritisches Urteil. Die Lage dieses Bedienelements ist deutlich innerhalb der Erreichbarkeitsgrenzen des Zielperzentils, allerdings muss für den seitlichen Eingriff das Handgelenk stark abgewinkelt werden. Dieser Extremwert in der Stellung des Handgelenks kann zur mittelmäßigen Bewertung in der Ramsis Diskomfort Analyse führen. Die Probanden bewerten dieses Standardbauteil allerdings eher unkritisch, da sie die Bediensituation bei der Türöffnung als Stand der Technik so gewohnt sind und diese vermeintlich unbequeme Bedienhandlung in diesem Falle akzeptieren.

Die Bedienung der Fensterheber, des Becherhalters und des Klimabedienelements werden sowohl in der Ramsis Diskomfort Analyse, als auch in der subjektiven Beurteilung der Probanden in der Perzentilsituation als eher unbequem eingestuft. Dies kann so auch nachvollzogen werden: Die Fensterheber sind für das Zielperzentil für eine bequeme Lage deutlich zu weit hinten platziert. Das Zielperzentil muss zur Bedienung deutlich nach hinten (x-Lage hinter Torso) greifen. Gleiches gilt für die Lage des Becherhalters, dieser befindet sich für das Zielperzentil vergleichsweise weit hinten und in einer ungünstigen Höhe, sodass der Ellbogen beim Entnehmen eines Bechers stark abgewinkelt werden

---

<sup>6</sup>Der Erreichbarkeitsraum wird für dieses Element als das bequeme Erreichen aus der neutralen Fahrposition definiert und spannt sich daher über die Gelenkkette von Schulterblatt bis zur Zeigefingerspitze auf.

muss. Die Position des Klimabedienelements befindet sich für das Zielperzentil sehr tief. Zur Bedienung muss der Arm vergleichsweise weit nach vorne unten gestreckt werden. Die Ergebnisse zum Handschuhkastenöffner fallen nach Auswertung der Versuchsergebnisse in unterschiedliche Kategorien. Die Ramsis Diskomfort Analyse stuft die Bediensituation mit maximalem Diskomfort ein. Dies liegt unter anderem daran, dass sich der Handschuhkastenöffner deutlich außerhalb des normalen Erreichbarkeitsraums des Zielperzentils befindet. Mit maximal ausgestrecktem Arm erreicht die Ramsissimulation den Handschuhkasten aus dem Sitz nicht. Die Lage des Hüftzentrums ist hierbei fixiert. In der Perzentilsimulation kategorisieren die Probanden die Bedienung des Handschuhkastens als mittelmäßig. Die Erreichbarkeit aus dem Sitz ist ebenfalls nicht gegeben, allerdings erleben die Probanden in der Perzentilsimulation, dass durch ein leichtes Herausheben ihres Körpers aus dem Sitz den Handschuhkasten erreichen können, wie dies auch bei der realen Bedienung für eine Person in der Größe des Zielperzentils der Fall wäre. Konkret darauf aufmerksam gemacht, beschreiben die Probanden die Bediensituation als eher schlecht erreichbar. Allerdings erfolgt dennoch nur eine Einstufung in die Kategorie mittelmäßig, zum Teil auch mit dem Kommentar, dass die Bedienung des Handschuhkastens nur bei stehendem Fahrzeug erfolgt und die Bediensituation in diesem Fall in Kauf genommen wird.

Somit lässt sich als Ergebnis der Studie festhalten, dass sich die Bewertungen der Probanden in der Perzentilsimulation in der eingesetzten Ramsis Diskomfort Analyse widerspiegeln. Die Diskrepanzen zwischen der Ramsis-Analyse und den Versuchsergebnissen lassen sich auch dadurch erklären, dass die Ramsis-Simulation bei den jeweiligen Körperhaltungen voraussetzt, dass es sich um eine länger andauernde Körperhaltung handelt. Die Versuchsperson ist sich jedoch bewusst, dass die eingenommene Haltung zwar unbequem ist, aber eben nur kurzfristig eingenommen wird. Dies ist beispielsweise der Fall beim Lichtdrehschalter, der im Normalfall unter Berücksichtigung des weit verbreiteten Automatik-Lichts nur sehr selten während der Fahrt betätigt wird.

Nach dem Erleben der Perzentilsimulation wurden die Probanden zudem nach ihrer subjektiven Einschätzung zur Perzentilsimulation befragt. Die Befragung zielt dabei auf drei Aspekte der Perzentilsimulation ab: Das Hineinversetzen in eine andere Person, das Erkennen und Erleben von anthropometrischen Problemen des Zielperzentils sowie die Eignung des aufgebauten Werkzeugs für den genannten Zweck. Wie aus Abbildung 4.9 ersichtlich, wurden diese Aspekte von den Probanden durchwegs positiv beurteilt.

Auch die Ergebnisse aus der im Rahmen der Studie durchgeführten Analyse zur Präsenz der Probanden während der Perzentilsimulation zeigt nur geringe Abweichungen im Präsenzepfinden zu den übrigen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. Dies spricht dafür, dass die Wahrnehmungsveränderung im Rahmen der Perzentilsimulation von den Probanden akzeptiert wird. Die detaillierte Auswertung der Versuchsergebnisse zu diesem Aspekt findet sich in Anhang D.3.

Ein weiteres Potential zur Ergänzung konventioneller arbeitswissenschaftlicher digitaler Menschmodelle durch die Perzentilsimulation ergibt sich aus den Ergebnissen von Spanner-Ulmer u. Mühlstedt (2009). Sie haben den Einsatz digitaler Menschmodelle in Industrie und Forschung untersucht und dabei neben dem Einsatzbereich auch das Potential für eine von den Anwendern gewünschten Weiterentwicklung identifiziert. Da-

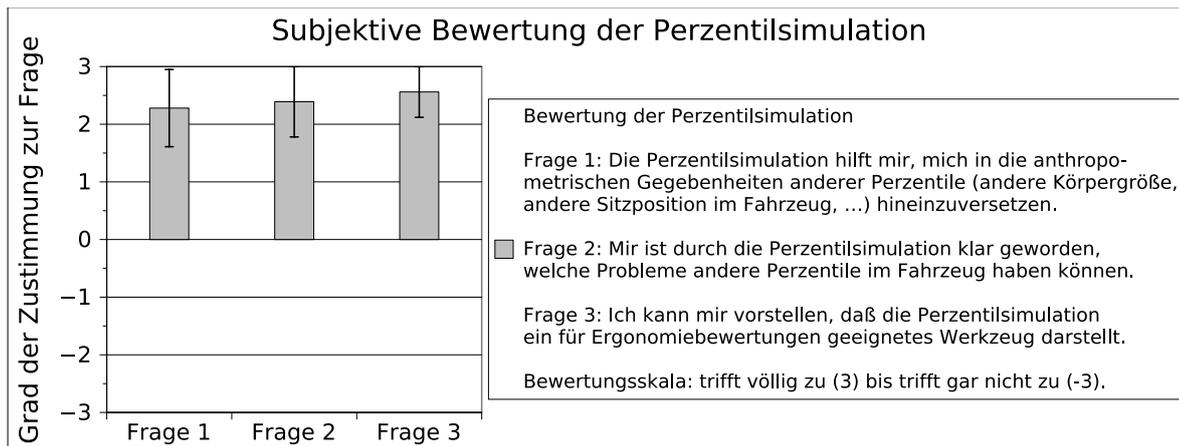


Abb. 4.9: Ergebnis der subjektiven Bewertung der Perzentilsimulation durch die Probanden

nach wird von der angebotenen Funktionalität am häufigsten die Visualisierung ergonomischer Ergebnisse genutzt, das Hauptinteresse an einer Weiterentwicklung besteht im Bereich der Haltungsanalysen. Die am meisten genutzten Manipulationsfunktionen sind das Anpassen der Körper- und Handhaltung sowie die Animation des Modells, in diesen Bereichen besteht auch das größte Interesse der Anwender an einer Weiterentwicklung der Systeme (vgl. Spanner-Ulmer u. Mühlstedt, 2009). Insbesondere stellen sie fest, dass das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen beim Einsatz konventioneller arbeitswissenschaftlicher digitaler Menschmodelle bei statischer (unbewegter) Simulation gute Aussagen zu arbeitswissenschaftlichen Fragen ermöglicht. Anders sieht es danach bei dynamischen Analysen aus. Die Bewegungssimulation in konventionellen Menschmodellen erfordert einen sehr hohen Aufwand zur Erarbeitung im Vergleich zum erzielbaren Nutzen. Jendrusch (2008) erwähnt hierzu ein durchschnittliches Verhältnis der zur Erstellung notwendigen Zeit zur tatsächlichen Zeitdauer der Simulation von ca. 250:1 bis 400:1. Da bei der Perzentilsimulation das digitale Menschmodell direkt über die Bewegungen des Anwenders gesteuert wird, ergibt sich hier eine deutliche Effizienzsteigerung bei der Bewegungssimulation, da die einzelnen Schritte der Animation der Szene von Hand entfallen. Auch das Anpassen der Körper- und Handhaltung wird in der Perzentilsimulation direkt über die Bewegungen des Anwenders gesteuert und stellt damit eine gute Ergänzung zu den konventionellen Methoden zum Einsatz arbeitswissenschaftlicher digitaler Menschmodelle dar. Im optimalen Fall lassen sich also dynamische Bewegungsanalysen mittels Perzentilsimulation durchführen und die entsprechenden kinematischen Restriktionen und Abfolgen wieder auf das digitale arbeitswissenschaftliche Menschmodell übertragen. Entsprechende Schnittstellen müssen dazu in der Lage sein, die kinematischen Informationen zwischen den verschiedenen Werkzeugen zu übertragen.

Aufgrund der dargestellten Aspekte stellt die Perzentilsimulation eine Ergänzung zu den klassischen digitalen arbeitswissenschaftlichen Menschmodellen dar. Während bei diesen die Simulation der Population im Vordergrund steht, befindet sich bei der

Perzentilsimulation das Erleben für den einzelnen Anwender neben der aufgezeigten Übertragungsmöglichkeiten aus dem Bereich der Haltungsanalysen im Fokus. Die dargestellten Erkenntnisse zeigen zusätzlich auch Möglichkeiten auf, die klassischen arbeitswissenschaftlichen Anwendungen zu ergänzen. Beispielsweise sollte, wie erläutert, die Dauer und Häufigkeit einer Bedienhandlung oder Körperhaltung bei einer Diskomfort-Bewertung berücksichtigt werden. Hier kann die immersive Simulation eines Fahrzeuginterieurs, wie in der vorliegenden Arbeit dargestellt, einen wichtigen Beitrag leisten. Hier können Bedienhandlungen in ihrer Dauer und zeitlich Abfolge schon in einem sehr frühen Entwicklungsstadium simuliert werden und die Ergebnisse wie angesprochen als Einflußgröße auf die statische Diskomfortbewertung berücksichtigt werden, wie dies z.B. bei der arbeitswissenschaftlichen Bewertung von Arbeitsplätzen Stand der Technik ist.

# 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Virtuelle Simulationen stellen einen Mehrwert bei der ergonomischen Konzipierung eines Fahrzeugs dar. Sie sind nicht nur in der Lage, reale physische Modelle zu ersetzen, sondern erweitern auch die Untersuchungsumfänge konventioneller CAD-Methodiken um zusätzliche Aspekte. Die vorliegende Arbeit zeigt Anhaltspunkte auf, wie ein immersives VR-Werkzeug aufgebaut sein muss, damit ein Anwender virtuell ergonomische Fragestellungen eines Fahrzeuginterieurs aus der Sicht des Fahrers selbst beantworten kann.

## 5.1 Zentrale Ergebnisse der Arbeit

Es werden Anforderungen an den Aufbau eines derartigen Untersuchungssystems abgeleitet, die sich einerseits aus dem Einsatzgebiet in der ergonomischen Auslegung und Analyse eines Fahrzeuginterieurs ableiten, andererseits in der menschlichen Wahrnehmung begründet sind. Beide Aspekte müssen als grundlegende Bestandteile eines immersiven Mixed-Reality-Aufbaus Beachtung finden, da durch sie einerseits festgelegt ist, was die Simulation beinhaltet („Was muss simuliert werden?“) und welche Stimuli berücksichtigt werden müssen („Wie muss simuliert werden?“). Dieser Aufbau, das virtuelle Fahrerplatzmodell, stellt die Kombination einer visuellen Simulation mit einer ausgeprägten haptischen Rückmeldung in Form eines variablen Ergonomiemodells dar. Inhalt der Arbeit sind der Aufbau, die Evaluierung und Weiterentwicklung des virtuellen Fahrerplatzmodells.

Die Evaluierung des virtuellen Fahrerplatzmodells besteht aus drei grundlegenden Evaluierungsbausteinen, die das Untersuchungsmedium hinsichtlich seiner Einsetzbarkeit zur Beurteilung ergonomische Fragestellungen in frühen Phasen der Konzeptentwicklung bewerten und gleichzeitig das Optimierungspotential aufzeigen. Hierzu wurden mehrere experimentelle Studien durchgeführt. In einer Untersuchung zur Größenwahrnehmung im verwendeten VR-System wurde ermittelt, ob die Anwender in der virtuellen Umgebung Elemente ebenso groß wahrnehmen, wie sie ihnen dargestellt werden. Der zweite Baustein behandelt die Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen. In einer experimentellen Studie wurde die Frage beantwortet, mit welcher Zuverlässigkeit ergonomische Untersuchungsaspekte in der virtuellen Umgebung bearbeitet werden können. Schließlich behandelt der dritte Hauptbestandteil des Evaluierungsverfahrens die korrekte Sitzposition im virtuellen Fahrerplatzmodell. In der zugehörigen Studie wird die Frage beantwortet, ob die Sitzposition in der virtuellen Umgebung der in einem realen Fahrzeug entspricht.

Zur Validierung der Größenwahrnehmung im virtuellen Fahrerplatzmodell wurde eine Probandenstudie durchgeführt, bei der die Teilnehmer die Größe eines virtuellen Objekts

an ein vorher gesehenes reales Referenzobjekt angleichen mussten. Dabei prägten sich die Probanden zunächst die Größe eines realen Referenzobjekts ein und skalierten anschließend ein virtuelles Ebenbild auf die vorher eingeprägte Größe. Es zeigt sich, dass die subjektiv empfundene Größenwahrnehmung der theoretisch bestimmten Größendarstellung am besten entspricht, wenn die Nutzer-Wahrnehmung der VR-Umgebung durch ein möglichst hohes Maß an Selbstrepräsentation unterstützt wird. Bei rein visueller Nutzung der VR-Umgebung zeigen die Ergebnisse des Experiments eine Unterschätzung im einstelligen Prozentbereich. Diese Wahrnehmungsverzerrungen im virtuellen Fahrerplatzmodell konnten durch eine Handrepräsentation des Nutzers signifikant verringert werden. Die Repräsentation des Nutzers im virtuellen Fahrerplatzmodell spielt eine entscheidende Rolle zur korrekten Wahrnehmung in der VR-Umgebung. Das Optimierungspotential besteht aufgrund dieser Ergebnisse im weiteren Ausbau der Menschrepräsentation im virtuellen Fahrerplatzmodell zu einer Visualisierung des kompletten menschlichen Körpers.

Aufbauend auf einem Untersuchungsansatz aus der Signalentdeckungstheorie wurde in einer weiteren Studie die Beurteilungsleistung ergonomischer Bewertungskriterien in der VR-Simulation ermittelt. Dazu wurden die Bewertungskriterien Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit verschiedener Bedienelemente aus einem Fahrzeuginnenraum analysiert. Die eingesetzte Untersuchungsmethodik basiert im Wesentlichen auf der Auslegung eines Fahrzeuginnenraums mit ergonomischen Gestaltungsmängeln und einem Vergleich der Beurteilungsleistung in einem virtuellen und einem korrespondierenden realen Fahrzeuginnenraum. Eine zuverlässige Identifikation der Gestaltungsmängel und gleichzeitig eine ebenfalls zuverlässige korrekte Zurückweisung bei Beurteilungsobjekten ohne Gestaltungsmangel kennzeichnen eine gute Beurteilungsleistung. Die dabei im rein visuell genutzten VR-System virtuelle Fahrerplatzmodell erzielbaren Beurteilungsleistungen bestätigen den Ansatz, die Visualisierung des virtuellen Fahrerplatzmodells mit einem realen variablen Fahrerplatzmodell zu ergänzen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Fragestellungen zur Auffindbarkeit oder Sichtbarkeit von Elementen des Fahrer Arbeitsplatzes keine signifikanten Unterschiede bezüglich der erzielbaren Beurteilungsleistung zwischen dem virtuellen Fahrerplatzmodell und einem realen Referenzmodell bestehen. 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. Als Hauptprobleme traten hierbei in einer rein visuellen Simulation neben der fehlenden Kollisionsrückmeldung, Verdeckungen durch den eigenen Körper oder andere Elemente sowie Störeffekte, die aus der stereoskopischen Darstellung in einem Head-Mounted Display herrühren, auf. Beim Untersuchungskriterium Bedienbarkeit konnten signifikante Unterschiede bei der Bewertung im rein visuell genutzten virtuellen Fahrerplatzmodell im Vergleich zu einem realen Referenzmodell festgestellt werden. Als Hauptproblem stellte sich bei diesem Bewertungskriterium ebenfalls die fehlende Erkennung von Kollisionen und Durchdringungen dar.

Aus diesen Erkenntnissen läßt sich folgern: Für Untersuchungen zur Erreichbarkeit und Bedienbarkeit sollte das virtuelle Modell durch eine ausgeprägte haptische Rückmeldung ergänzt werden. Die Studie bestätigt damit den Ansatz des virtuellen Fahrerplatzmo-

dells als eine Kombination einer visuellen Simulation mit einer ausgeprägten haptischen Rückmeldung in Form eines variablen Ergonomiemodells. Das virtuelle Fahrerplatzmodell stellt damit ein Werkzeug dar, in dem ergonomische Auslegungsaspekte wie Sicht, Auffindbarkeit, Erreichbarkeit und Bedienbarkeit in einer frühen Konzeptphase bewertet werden können. Für Elemente, die nicht im variablen Modell vorhanden sind, wurde eine virtuelle Kollisionserkennung implementiert. Kollisionen zwischen realen Objekten und virtuellen Objekten können zusätzlich visuell durch ein Verfärben des virtuellen Objekts kenntlich gemacht werden. Die Einsetzbarkeit der Funktionalität zur Kollisionswahrnehmung wurde in einer weiteren Probandenstudie zu den Entnahmebewegungen eines Bechers aus einer Aufnahme im Fahrzeuginnenraum in der virtuellen und realen Umgebung bestätigt.

Die Positionierung des Nutzers im virtuellen Fahrerplatzmodell wurde ebenfalls in einer Probandenstudie untersucht. Es konnte dabei die Reproduzierbarkeit der Sitzposition aus einem Realfahrzeug im virtuellen Fahrerplatzmodell nachgewiesen werden. In den Versuchsergebnissen zeigt sich, dass die durch ein HMD verursachten mechanischen Einschränkungen sowie die Einschränkungen des Sichtfelds durch das HMD keine nachweisbaren Auswirkungen auf die Positionierung des Anwenders im Fahrzeug haben.

Der Mehrwert in der ergonomischen Auslegung eines Fahrzeuginnenraums, welchen das virtuelle Fahrerplatzmodell gegenüber konventionellen CAD-Methoden bietet, wird darüber hinaus in der vorgestellten Methodik der Perzentilsimulation ersichtlich. Ziel der Perzentilsimulation ist es einen Anwender in die Perspektive eines beliebigen Körperperzentils hineinzusetzen und ihn in einen virtuellen Fahrzeuginnenraum aus genau dieser Perspektive erleben zu lassen. In virtuellen Umgebungen ist es unter Einsatz visueller und haptischer Stimuli möglich, den Anwender in einen virtuellen Körper hineinzusetzen, den er als seinen eigenen Körper wahrnimmt und akzeptiert. Der Ansatz der Perzentilsimulation nutzt dabei die technischen Möglichkeiten, die das virtuelle Fahrerplatzmodell bietet in Form von visueller und haptischer Simulation sowie des eingesetzten digitalen Menschmodells. Der Vorteil dieses neuartigen Ansatzes besteht unter anderem darin, dass die originalen Daten des Fahrzeuginnenraums zur Visualisierung verwendet werden können. Die visuelle Darstellung der Daten erfolgt ohne jegliche Verzerrung. Die Darstellung des haptischen Feedbacks erfolgt über eine vorher ermittelte Einstellung des variablen Ergonomiemodells. In Kombination mit einer speziellen Anpassung des eingesetzten digitalen Menschmodells zur Visualisierung des zu simulierenden Körperperzentils kann eine exakte Überlagerung der visuellen und haptischen Daten in der Perzentilsimulation dargestellt werden. In einer anschließenden Probandenstudie konnte gezeigt werden, dass die Perzentilsimulation den konventionellen Einsatzbereich digitaler Menschmodelle in der Arbeitswissenschaft erweitert, indem sie den Entwickler bei der Interpretation seiner Ergebnisse unterstützt. Desweiteren stellt der Ansatz der Perzentilsimulation ein hilfreiches Medium für die Kommunikation arbeitswissenschaftlicher Analyseergebnisse an einen Personenkreis mit geringerer Erfahrung im Bezug auf die Fahrzeugergonomie dar und unterstützt den Prozess der Entscheidungsfindung zu ergonomischen Fragestellungen bei der Fahrzeugkonzipierung.

## 5.2 Ausblick und zukünftige Entwicklungen

Mit Hilfe von Simulationsmethoden aus dem Bereich der virtuellen Realität ist ein Entwickler heute in der Lage, die Auslegung eines Produktes unter verschiedensten Blickwinkeln, z.B. einer ergonomisch optimalen Konzipierung, effizient und effektiv durchzuführen. Dabei muss einerseits sichergestellt sein, dass die Simulationsergebnisse in die Realität übertragbar sind, wie dies exemplarisch an der Bewertbarkeit ergonomischer Bewertungskriterien in einem virtuellen Fahrerplatzmodell in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen wurde. Andererseits muss gewährleistet sein, dass die durch die Simulationsmethoden erzielbaren Zeit- und Kostenvorteile sowie inhaltlicher Mehrwert nicht durch den Mehraufwand zur Bedienung eines derartig komplexen Gesamtsystems aufgewogen werden. Um sich voll und ganz auf den Inhalt einer Simulation konzentrieren zu können, sollte das Gesamtsystem möglichst bedienfreundlich und intuitiv verständlich sein. Bei der vorgestellten Simulationsmethode handelt es sich allerdings um ein komplexes Zusammenspiel verschiedenster neuartiger Technologien, mit denen nur eine kleine Gruppe an Experten ohne Weiteres im Erstkontakt problemlos zurechtkommt. Diese Aspekte müssen bei der technischen Weiterentwicklung des virtuellen Fahrerplatzmodells berücksichtigt werden. Das Potential zum weiteren Ausbau des virtuellen Fahrerplatzmodells besteht dabei in verschiedenen Themenbereichen. Hier gilt es auch zukünftig innovative Trends aufzugreifen und gezielt zu integrieren. Beispielsweise beschreiben Slater u. a. (2008) in einer Studie, dass in einer virtuellen Umgebung mit einer neuartigen Darstellungstechnologie, deren Visualisierungsqualität nahezu fotorealistisch ist, bei den Anwendern ein höherer subjektiver Präsenzeindruck realisiert werden kann. Ähnliche visuelle Qualitätsverbesserungen aus dem Bereich der Displaytechnologie sind mit der zunehmenden Verbreitung autostereoskopischer Displays und Videobrillen im Consumer-Bereich zu erwarten. Dabei kann man davon ausgehen, dass das Vertrauen in Simulationsmethoden zunimmt, je weiter verwandte Darstellungssysteme dem Anwender bereits aus anderen Bereichen bekannt sind. Zukünftig werden weitere Technologien ihren Weg aus der Forschung hin zum industriellen Umfeld finden, die eine ausgeprägte Multimodalität in der virtuellen Realität möglich machen. Exemplarisch sind hier die Ergebnisse von Melchior u. Spors (2010) zu nennen, die basierend auf dem Prinzip der Wellenfeldsynthese ein akustisches Display vorstellen, das virtuell den Ursprung einer Schallquelle im Raum simulieren kann. Angewandt auf das virtuelle Fahrerplatzmodell, könnte mit dieser Technologie die Kollisionswahrnehmung zusätzlich unterstützt werden. Beispielsweise sind hier Betätigungsgeräusche beim Drücken eines Tasters auf der Schalttafel oder beim Bedienen des Handschuhkastens zu nennen, die für den Anwender räumlich korrekt dargestellt werden. In einer weiteren Entwicklungsstufe könnten Geräusche örtlich korrekt simuliert werden, die auftreten, wenn virtuelle Oberflächen mit den Händen oder anderen Körperteilen berührt werden, jeweils entsprechend der Material- und Packagesituation an der Position der Kollision bzw. Berührung. Die durch derartige Maßnahmen zu erwartende Steigerung der subjektiven Präsenz des Anwenders in der virtuellen Umgebung führt einerseits zu mehr Vertrauen in die Simulation und kann andererseits dazu beitragen, Schwachpunkte bei der Simulation anderer Stimuli auszugleichen.

Beim Ausbau der Selbstrepräsentation des Nutzers durch ein digitales Menschmodell

muss aus Anwendersicht vor allem auf eine schnelle und mühelose Kalibration des Modells geachtet werden. Trotzdem darf die exakte Anpassung an den Anwender hinsichtlich der korrekten kinematischen Bewegung und der genauen Überlagerung der visuellen Daten nicht vernachlässigt werden. Beide Aspekte stellen eine wichtige Voraussetzung dar, um einen hinreichenden Grad der Akzeptanz beim Anwender zu erzielen. Eine Lösung dieses Spannungsfelds könnten die in der Arbeit aufgezeigten Ansätze des modellbasierten oder hybriden Trackings sein. Die im virtuellen Fahrerplatzmodell verwendeten Trackingverfahren sind den meisten Anwendern nicht bekannt. Neben der subjektiv wahrgenommenen physischen Einschränkung durch die große Anzahl an Trackingtargets am Körper sind hier teilweise deutliche Berührungängste seitens unerfahrener Anwender anzumerken. Es ist zu erwarten, dass ein für die Nutzer möglichst nicht sichtbares Trackingverfahren diese Vorbehalte mindert und somit Hemmschwellen bezüglich der Verwendung des virtuellen Fahrerplatzmodells reduziert.

Aus den eben erläuterten Zusammenhängen lässt sich leicht ableiten, dass eine nachhaltige Weiterentwicklung hochspezialisierter VR-Systeme mit sehr dediziertem Anwendungsgebiet wie dem virtuellem Fahrerplatzmodell die inhaltlichen Anforderungen des Fachbereichs zielorientiert mit dem technologischen Fortschritt und innovativen Trends kombiniert. Nur so ist es möglich VR-Technologie nicht als technische Spielerei, sondern als effizientes und effektives Hilfsmittel im täglichen Arbeitsalltag zu etablieren.



# Literaturverzeichnis

- [Araki u. a. 2007] ARAKI, Fumiaki ; KAWAHARA, Shintaro ; OHNO, Nobuaki: *Virtual Reality System and Three-dimensional Visualization*. The Earth Simulator Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. <http://www.jamstec.go.jp/esc/research/Perception/vr.en.html>. Version: 2007. – [30.10.2010]
- [Armbrüster 2008] ARMBRÜSTER, Claudia: *Virtuelle Realität in der experimentellen Psychologie - Forschungsmethode versus Forschungsgegenstand. Untersuchungen aus den Bereichen Wahrnehmung und Psychomotorik*. Studienreihe psychologische Forschungsergebnisse, Band 131. Hamburg : Verlag Dr. Kovac, 2008
- [Auer 2000] AUER, Thomas: *Hybrid Tracking for Augmented Reality*, Technische Universität Graz, Diss., 2000
- [Bartle 2003] BARTLE, Richard A.: *Designing Virtual Worlds*. New Riders Publishing, Indianapolis, 2003
- [Becker 2010] BECKER, Hartmut: *Grauer Star - Anatomie des Auges*. Internet-Portal des im Wort & Bild Verlag erscheinenden Gesundheitsmagazins Apotheken Rundschau. <http://www.apotheken-umschau.de/Grauer-Star>. Version: 2010. – [30.10.2010]
- [Bokranz u. Landau 2006] BOKRANZ, Rainer ; LANDAU, Kurt: *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen*. Schäffer-Poeschel Verlag, 2006
- [Bortz 2005] BORTZ, Jürgen: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg : Springer Medizin, 2005
- [Botvinick u. Cohen 1998] BOTVINICK, Matthew ; COHEN, Jonathan: Rubber hands feel touch that eyes see. In: *Nature* Vol. 391 (1998), Februar, S. 756
- [Bowden u. a. 1996] BOWDEN, Richard ; HEAP, Tony ; HART, Craig: *Virtual Data Gloves : Interacting with Virtual Environments through Computer Vision*. (1996), School of Computer Studies University of Leeds, Department of M & ES Brunel University Uxbridge. <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Bowden/publications/vrsig97/vrsig.pdf>. – [30.10.2010]
- [Braun 1999] BRAUN, Michael: Entwicklung eines variablen Ergonomie-Prüfstandes mit CAD-Anbindung und Validierung einer Arbeitsmethodik. Dissertation an der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik* Bd. 12, Nr. 374, 1999

- [Brill 2009] BRILL, Manfred: *Virtuelle Realität*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009
- [Brockhaus 1997] BROCKHAUS: *Brockhaus - Die Enzyklopädie*. F.A. Brockhaus GmbH Leipzig-Mannheim, Auflage: 20., überarb. und aktualisierte Auflage, 1997
- [Creem-Regehr u. a. 2005] CREEM-REGEHR, Sarah ; WILLEMSEN, Peter ; GOOCH, Amy ; THOMPSON, William: *The Influence of Restricted Viewing Conditions on Egocentric Distance Perception*. Department of Psychology, University of Utah, Salt Lake City, 2005
- [Cutting u. Vishton 1995] CUTTING, James ; VISHTON, Peter: Perceiving Layout and Knowing Distances: The Integration, Relative Potency and Contextual Use of Different Information about Depth. In: EPSTEIN, William (Hrsg.) ; ROGERS, Sheena (Hrsg.): *Perception of Space and Motion* Bd. 5. San Diego : Academic Press, 1995, S. 69–117
- [Daecke 2009] DAECKE, Julia: *Nutzung virtueller Welten zur Kundenintegration in die Neuproduktentwicklung - Eine explorative Untersuchung am Beispiel der Automobilindustrie*, Universität Bamberg, Lehrstuhl für Personalwirtschaft und Organisation, Diss., 2009
- [DIN 15996 2006] Norm DIN 15996 Februar 2006. *Bild- und Tonbearbeitung in Film-, Video- und Rundfunkbetrieben; Grundsätze und Festlegungen für den Arbeitsplatz*
- [DIN 33402-2 2006] Norm DIN 33402-2 Juli 2006. *Ergonomie - Körpermaße des Menschen. Teil 2: Werte*.
- [DIN 894-3 2000] Norm DIN 894-3 Juni 2000. *Sicherheit von Maschinen: Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen. Teil 3: Stellteile*.
- [DIN ISO 3958 1978] Norm DIN ISO 3958 November 1978. *Personenkraftwagen. Handreichweiten des Fahrzeugführers*.
- [Duden 2009] DUDEN: *Duden Die deutsche Rechtschreibung: Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln*. Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus, Auflage: 25., vollst. neu bearb. u. erw. Auflage, 2009
- [Duh u. a. 2004] DUH, H. ; PARKER, D. ; PHILIPS, J. ; FURNESS, T.: Conflicting motion cues to the visual and vestibular self-motion systems around 0.06 Hz evoke simulator sickness. In: *Human Factors* Vol. 46 (2004), S. 142–153
- [Ellis u. Menges 1998] ELLIS, S. ; MENGES, B.: Localization of Virtual Objects in the near Visual Field. In: *Human Factors* Bd. 40, 1998, S. 415–431
- [Engstler 2005] ENGSTLER, Florian: *Untersuchung zur Größenwahrnehmung in virtuellen Umgebungen und deren Anwendung für ergonomische Fragestellungen*, Technische Universität München, Institut für Produktionstechnik, Diplomarbeit, 2005

- [Engstler u. a. 2008] ENGSTLER, Florian ; BANDOUCHE, Jan ; BEETZ, Michael: Accurate Human Motion Capture Using an Ergonomics-Based Anthropometric Human Model. (2008), Lehrstuhl für Ergonomie der Fakultät Maschinenwesen & Intelligent Autonomous Systems Group am Lehrstuhl für Informatik, TU München
- [Ernst 2001] ERNST, Marc O. ; AUFLAGE, 1. (Hrsg.): *Psychophysikalische Untersuchungen zur Visuomotorischen Integration beim Menschen: Visuelle und Haptische Wahrnehmung Virtueller und Realer Objekte*. MVK Medien Verlag Köhler, Tübingen, 2001
- [Fellner 1992] FELLNER, Wolf-Dietrich: *Computergrafik*. Auflage: 2., vollst. überarb. u. erw. Spektrum Akademischer Verlag, 1992
- [Fine u. Jacobs 1999] FINE, Ione ; JACOBS, Robert: Modeling the Combination of Motion, Stereo and Vergence Angle Cues to Visual Depth. In: *Neural Computation* Bd. 11, 1999, S. 1297–1330
- [Forbes u. Dayal 2010] FORBES, Ron ; DAYAL, Arjun: *How You Become the Controller*. Microsoft Xbox Live - Engineering Blog. <http://www.xbox.com/en-US/Live/EngineeringBlog/122910-HowYouBecometheController>. Version: 2010. – [30.10.2010]
- [Gillam 1995] GILLAM, Barbara: The Perception of Spatial Layout from Static Optical Information. In: EPSTEIN, William (Hrsg.) ; ROGERS, Sheena (Hrsg.): *Perception of Space and Motion* Bd. 5. San Diego : Academic Press, 1995, S. 23–67
- [Goldstein 2008] GOLDSTEIN, Bruce: *Wahrnehmungspsychologie - Der Grundkurs*. Spektrum Akademischer Verlag, 2008
- [Gooch u. Willemsen 2002] GOOCH, Amy ; WILLEMSSEN, Peter: *Evaluating Space Perception in NPR Immersive Environments*. School of Computing, University of Utah, Salt Lake City, 2002
- [Gude 2004] GUDE, Dietmar: Prospektive Ergonomie beim Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz - Unterstützungspotential virtueller Realität. In: *Zentralblatt Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie* Bd. 54, 2004
- [Gude 2008] GUDE, Dietmar: *Virtuelles Prototyping*. TU Dortmund, Leibniz-Institut für Arbeitsforschung. <http://www.ergonetz.de/virtual-prototyping/>. Version: 2008. – [30.10.2010]
- [Hagenmeyer u. a. 2003] HAGENMEYER, Lorenz ; BRAUN, Martin ; HASELBERGER, Frank: Entwicklung eines Mixed-Mock-Up Simulators für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen. In: SZWILLUS, Gerd (Hrsg.) ; ZIEGLER, Jürgen (Hrsg.): *Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung*. Stuttgart : B.G. Teubner, 2003, S. 145–154

- [Haines u. a. 2002] HAINES, Helen ; WILSON, John ; VINK, Peter ; KONINGSVELD, Ernst: Validating a framework for participatory ergonomics. In: *Ergonomics* Bd. 45/4, 2002, S. 309–327
- [Haption 2010] HAPTION: *Vituose 6D35-45*. Haption S.A. <http://www.haption.com/site/eng/html/materiel.php?item=1>. Version: 2010. – [30.10.2010]
- [Hartung 2006] HARTUNG, Jürgen: *Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz*, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, Diss., 2006
- [Heller u. a. 1974] HELLER, Kurt ; ROSEMAN, Bernhard ; GAEDIKE, Anne-Katrin: *Planung und Auswertung empirischer Untersuchungen*. 1. Auflage. Stuttgart : Ernst Klett Verlag, 1974
- [Henry u. Furness 1993] HENRY, D. ; FURNESS, T.: Spatial Perception in Virtual Environments: Evaluating an Architectural Application. In: *Proceedings of the IEEE Conference - Virtual Reality Annual International Symposium*. Seattle, 1993, S. 33–40
- [Hillaire u. a. 2007] HILLAIRE, Sébastien ; LÉCUYER, Anatole ; COZOT, Rémi ; CASIEZ, Géry: Depth-of-Field Blur Effects for First-Person Navigation in Virtual Environments. In: *Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. New York : ACM, 2007
- [Hoffmann 2005] HOFFMANN, D.: „Mixed Reality“ – Prototyping mal ganz anders. In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe*. Düsseldorf : Springer-VDI-Verlag, Ausgabe 1/2 2005, S. 33–34
- [Hofmann 2002] HOFMANN, Jan ; AUFLAGE, 1. (Hrsg.): *Raumwahrnehmung in virtuellen Umgebungen*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2002
- [ISO 4040 2009] Norm ISO 4040 Februar 2009. *Road Vehicles. Location of Hand Controls, Indicators and Tell-Tales in Motor Vehicles*.
- [Jendrusch 2008] JENDRUSCH, R.: *Validität der Ergonomiebewertung mit digitalen Menschsimulationen.*, Professur Arbeitswissenschaft, TU Chemnitz, Diplomarbeit, 2008
- [Kanning 2009] KANNING, Reiner: *Ausreißertest nach Grubbs*. <http://www.neugrad.de/statistik/ausreisser/ausreisser.html>. Version: 2009. – [30.10.2010]
- [Keyson 2000] KEYSON, David: Estimation of Virtually Perceived Length. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* Bd. 9, 2000, S. 394–398
- [Lampton u. a. 1995] LAMPTON, D. ; SINGER, M. ; McDONALD, D. ; BLISS, J.: Distance Estimation in Virtual Environments. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 39th Annual Meeting*. San Diego, 1995, S. 1268–1272

- [Landy u. a. 1995] LANDY, Michael ; MALONEY, Laurence ; JOHNSTON, Elizabeth ; YOUNG, Mark: Measurement and Modeling of Depth Cue Combination: in Defense of Weak Fusion. In: *Vision Research* Bd. 35/3, Elsevier Science, 1995, S. 389–412
- [Lorenz 2010] LORENZ, Daniel: Validierung eines variablen und virtuellen Fahrerplatzmodells zur Beurteilung von Sitzpositionen. In: *VDI-Fachtagung: „Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung“*. Baden-Baden, November 2010
- [Lorenz u. a. 2008] LORENZ, Stephan ; KAISER, Ralf ; ASSMANN, Ernst ; ENGSTLER, Florian ; ZÖLLNER, Rolf: Ergonomieabsicherung im Fahrzeug mittels Mixed Reality: Beeinflussung der Sitzposition durch die Vorgehensweise bei der Sitzeinstellung. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* Bd. 01/2008, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft GfA e.V., Ergonomia Verlag Stuttgart, Februar 2008
- [Mathews u. a. 2003] MATHEWS, Nestor ; MENG, Xin ; XU, Peng ; QIAN, Ning: A Physiological Theory of Depth Perception from Vertical Disparity. In: *Vision Research* Bd. 43, Elsevier Science, 2003, S. 85–99
- [Melchior u. Spors 2010] MELCHIOR, Frank ; SPORS, Sascha: Spatial Audio Reproduction: From Theory to Production. In: *128th Convention of the AES*. London, 2010
- [Melzer u. Moffitt 1996] MELZER, James ; MOFFITT, Kirk ; FISCHER, Robert (Hrsg.) ; SMITH, Warren (Hrsg.): *Head Mounted Displays – Designing for the user*. 1. Edition. New York : McGraw-Hill Optical and Electro-optical Engineering Series, 1996
- [Messing u. Durgin 2004] MESSING, Ross ; DURGIN, Frank: Space Perception and Cues to Distance in Virtual Reality. In: *APGV 04: Proceedings of the 1st Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. New York : ACM, 2004, S. 176
- [Messing u. Durgin 2005] MESSING, Ross ; DURGIN, Frank: Distance Perception and the Visual Horizon in Head Mounted Displays. In: *ACM Trans. Appl. Percept.* Bd. 3, 2005, S. 234–250
- [van der Meulen u. Speyer 2008] MEULEN, Peter van d. ; SPEYER, Hartmut: RAMSIS - The Discomfort Assessment / Human Solutions GmbH. 2008. – Forschungsbericht
- [Milgram u. a. 1995] MILGRAM, P. ; DRASIC, D. ; GRODSKI, J.J. ; RESTOGI, A. ; ZHAI, S. ; ZHOU, C.: Merging Real and Virtual Worlds. In: *Proceedings of IMAGINA '95*, 1995
- [Nagata 1991] NAGATA, Shojiro: How to reinforce Perception of Depth in Single Two-Dimensional Pictures. In: ELLIS, Stephen (Hrsg.) ; KAISER, Mary (Hrsg.) ; GRUNWALD, Arthur (Hrsg.): *Pictorial Communication in Virtual and Real Environments*. London : Taylor & Francis, 1991, S. 527–545
- [Oehme 2004] OEHME, Olaf: *Ergonomische Untersuchung von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service*, RWTH Aachen, Diss., 2004

- [Petkova u. Ehrsson 2008] PETKOVA, Valeria ; EHRSSON, Henrik: If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping. In: *PLoS ONE* Vol. 3 (2008), Dezember, Nr. 12. <http://dx.crossref.org/10.1371/journal.pone.0003832>. – [30.10.2010]
- [Phillips u. a. 2010] PHILLIPS, Lanee ; RIES, Brian ; KAEDING, Michael ; INTERRANTE, Victoria: *Avatar Self-Embodiment Enhances Distance Perception Accuracy in Non-Photorealistic Immersive Virtual Environments*. Department of Computer Science, University of Minnesota, 2010
- [Probst 2010] PROBST, Tina: *Konzeptionelle Entwicklung einer Sprachsteuerung für ein immersives VR-System und Validierung anhand zweier Praxisbeispiele*, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Diplomarbeit, 2010
- [Reason 1978] REASON, J.: Motion sickness adaptation: A neural mismatch model. In: *Journal of the Royal Society of Medicine* Vol. 71 (1978), S. 819–829
- [Reif 2009] REIF, Rupert: *Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems*, Technischen Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2009
- [Richards u. Bhise 2004] RICHARDS, Arthur ; BHISE, Vivek: *Evaluation of the PVM Methodology to Evaluate Vehicle Interior Packages*. <http://www.prefix.com/PVM/>. Version: August 2004. – [30.10.2010]
- [Riedel 1997] RIEDEL, Oliver: *3D-Echtzeit-Rendering unter Berücksichtigung der Anatomie und Physiologie des menschlichen Auges*, Universität Stuttgart, Diss., 1997
- [Rockwell-Collins, Inc. 2010] ROCKWELL-COLLINS, INC.: *Specification Sheet for Rockwell Collins ProView SR80-A*. Carlsbad. [http://www3.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf\\_11456.pdf](http://www3.rockwellcollins.com/content/pdf/pdf_11456.pdf). Version: 2010. – [17.01.2011]
- [Rokita 1996] ROKITA, P.: Generating Depth-of-Field Effects in Virtual Reality Applications. In: *Computer Graphics and Applications*, 1996
- [Rolland u. Fuchs 2001] ROLLAND, Jannick ; FUCHS, Henry: Optical versus Video See-Through Head-Mounted Displays. In: BARFILED, Woodrow (Hrsg.) ; CAUDELL, Thomas (Hrsg.): *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Mahwah : Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 2001, S. 113–156
- [Roosen 2010] ROOSEN, Gottfried: *Able Exoskelett*. Haption Deutschland. <http://www.gottfried-roosen.de/index.html>. Version: 2010. – [30.10.2010]
- [Rottenkolber u. a. 2004] ROTTENKOLBER, Birgit ; EDELMANN, Martin ; HÖLLER, Frank: Gestaltungsempfehlungen für Head-Mounted-Displays. In: LUCZAK, Holger (Hrsg.) ; SCHMIDT, Ludger (Hrsg.) ; KOLLER, Franz (Hrsg.): *Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2004 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 22, Bd. 17), S. 27–39

- [Sadava u. a. 2007] SADAVA, David ; HELLER, Craig ; ORIAN, Gordon ; PURVES, William ; HILLIS, David: *Life: The Science of Biology*. Palgrave Macmillan, Auflage: 8, 2007
- [Sahm u. a. 2005] SAHM, Cynthia ; CREEM-REGEHR, Sarah ; WILLIAM, Thompson ; PETER, Willemssen: Throwing versus Walking as Indicators of Distance Perception in similar Real and Virtual Environments. In: *ACM Trans. Appl. Percept.* Bd. 2, 2005, S. 35–45
- [Salzmann u. a. 2009] SALZMANN, Holger ; JACOBS, Jan ; FROEHLICH, Bernd: Collaborative Interaction in Co-Located Two-User Scenarios. In: *Proceedings of Joint Virtual Reality Conference (JVRC) - the 15th Eurographics Symposium on Virtual Environments, ICAT, EuroVR, Lyon, 2009*, S. 85–92
- [Scharm u. Breining 1999] SCHARM, H. ; BREINING, R.: How Automotive Industry uses Immersive Projection Technology. In: BULLINGER, H.-J. (Hrsg.) ; RIEDEL, O. (Hrsg.): *Forschung und Praxis T52: Proceedings of the 3rd International Immersive Projection Technology Workshop*, Springer-Verlag, 1999, S. 133–144
- [Schlegel 2010] SCHLEGEL, Michael: *Markerloses Motion Capturing in Echtzeit*. Institute of Software Technology and Interactive Systems Vienna University of Technology. [http://www.ims.tuwien.ac.at/teaching\\_detail.php?ims\\_id=188456](http://www.ims.tuwien.ac.at/teaching_detail.php?ims_id=188456). Version: 2010. – [30.10.2010]
- [Schmid 1995] SCHMID, Reiner ; AUFLAGE, 1. (Hrsg.): *Industrielle Bildverarbeitung: Vom visuellen Empfinden zur Problemlösung*. Vieweg Verlag, 1995
- [Schmidtke 1993] SCHMIDTKE, Heinz: *Ergonomie*. Hanser, München, 3. Auflage, 1993
- [Schrader 2003] SCHRADER, Kai: *Entwurf und Realisierung eines Ergonomie-Mock-Ups unter Verwendung von Methoden der Virtuellen Realität*, Technische Universität Braunschweig, Fachbereich für Mathematik und Informatik, Diss., 2003
- [Seidl 2011] SEIDL, Andreas: Effiziente Innenraumentwicklung / Human Solutions GmbH. Version: 2011. <http://www.human-solutions.com/automotive/>. 2011. – Forschungsbericht. – [30.10.2010]
- [Sekuler u. Blake 1994] SEKULER, Robert ; BLAKE, Randolph: *Perception*. 3rd Edition. New York : McGraw-Hill Companies, 1994
- [Sisca u. a. 2008] SISCA, Sebastian ; MOGAN, Gheorghe ; SUBRI, Kevin: Virtual and Real Testing of Products. In: TALABA, Doru (Hrsg.) ; AMDITIS, Angelos (Hrsg.): *Product Engineering: Tools and Methods based on Virtual Reality*. Stuttgart : Springer, 2008, S. 449–460
- [Slater u. a. 2008] SLATER, Mel ; KHANNA, Pankaj ; MORTENSEN, Jesper ; YU, Insu: Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment

/ Department of Computer Science, University College London, UK. 2008. – Forschungsbericht

- [Slater u. a. 2009] SLATER, Mel ; PEREZ-MARCOS, Daniel ; EHRSSON, Henrik ; SANCHEZ-VIVES, Maria: Inducing Illusory Ownership of a Virtual Body. In: *Frontiers of Neuroscience* Vol. 3 (2009), September, Nr. 2, S. 214–220
- [Slater u. a. 2010] SLATER, Mel ; SPANLANG, Bernhard ; SANCHEZ-VIVES, Maria ; BLANKE, Olaf: First Person Experience of Body Transfer in Virtual Reality. In: *PLoS ONE* Vol. 5 (2010), Mai, Nr. 5. <http://dx.crossref.org/10.1371/journal.pone.0010564>. – [30.10.2010]
- [Slater u. Steed 2000] SLATER, Mel ; STEED, Anthony: A Virtual Presence Couter. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* Bd. 9, 2000, S. 413–434
- [Spanner-Ulmer u. Mühlstedt 2009] SPANNER-ULMER, Birgit ; MÜHLSTEDT, Jens: Digitale Menschmodelle und deren Einsatz in der Praxis. (2009), Professur Arbeitswissenschaft der TU Chemnitz
- [Srinivasan u. Basdogan 1997] SRINIVASAN, M.A. ; BASDOGAN, C.: Haptics in Virtual Environments: Taxonomy, Research Status and Challenges. In: *Computer and Graphics* Bd. 21, 1997, S. 393–404
- [Stäbler 2007] STÄBLER, Melanie: *Systemvergleich zweier VR-Systeme vom Datenfluss bis zum Echtzeit-Raytracing*, Fachhochschule Ansbach, Studiengang Multimedia und Kommunikation, Diplomarbeit, 2007
- [Stoffregen u. a. 2008] STOFFREGEN, Thomas ; YOSHIDA, Ken ; FLANAGAN, Moira ; MERHI, Omar ; FAUGLOIRE, Elise: Motion Sickness and Postural Sway in Console Video Games. In: *Human Factors* Vol. 50 (2008), Nr. 2, S. 322–331
- [Surdick u. a. 1997] SURDICK, R. ; DAVIS, E. ; KING, R. ; HODGES, L.: The Perception of Distance in Simulated Visual Displays: A Comparison of the Effectness and Accuracy of Multiple Depth Cues Across Viewing Distances. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* Bd. 6, 1997, S. 513–531
- [Sutherland 1965] SUTHERLAND, Ivan E.: The Ultimate Display. In: *Proceedings of IFIP Congress*, 1965, S. 506–508
- [Swets u. Green 1966] SWETS, John ; GREEN, David: *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York : Wiley, 1966
- [Tsai 1996] TSAI, J.-C.: *Toward Guaranteed Stability in the Haptic Display of Virtual Environments*, Northwestern University, Diss., 1996
- [Vecchi u. Girelli 1998] VECCHI, Tomaso ; GIRELLI, Luisa: Gender Differences in Visuo-Spatial Processing: The Importance of Distinguishing between Passive Storage and Active Manipulation. In: *Acta Psychologica* Bd. 99, 1998, S. 1–16

- [Voß 2008] VOSS, Till: *Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen*, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, Diss., 2008
- [Volpert 1990] VOLPERT, Walter: Welche Arbeit ist gut für den Menschen? Notizen zum Thema Menschenbild und Arbeitsgestaltung. In: FREI, Felix (Hrsg.) ; UDRES, Ivars (Hrsg.): *Das Bild der Arbeit*. Bern : Huber, 1990, S. 23–40
- [Vuylsteker 2004] VUYLSTEKER, Pascal: *Binocular Omni-Orientation Monitor*. Australian National University, Department of Computer Science. <http://escience.anu.edu.au/lecture/cg/Display/boom.en.html>. Version: 2004. – [30.10.2010]
- [Waller 1999] WALLER, D.: Factors Affecting the Perception of Interobject Distances in Virtual Environments. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* Bd. 8, 1999, S. 657–670
- [Waterworth 1999] WATERWORTH, John: *Virtual Reality in Medicine: A Survey of the State of the Art*. Umea University Sweden, Department of Informatics. <http://www8.informatik.umu.se/~jwworth/2Techniques>. Version: 1999. – [30.10.2010]
- [Willemsen u. a. 2008] WILLEMSSEN, Peter ; GOOCH, Andy ; THOMPSON, William ; CREEM-REGEHR, Sarah: Effects of Stereo Viewing Conditions on Distance Perception in Virtual Environments. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* Bd. 17, 2008, S. 91–101
- [Witmer u. Kline 1998] WITMER, B. ; KLINE, P.: Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* Bd. 7, 1998, S. 144–167
- [Witmer u. Sandowski 1998] WITMER, B. ; SANDOWSKI, W.: Nonvisually Guided Locomotion to a Previously Viewed Target in Real and Virtual Environments. In: *Human Factors* Bd. 40, 1998, S. 478–488
- [Yazadi 2010] YAZADI, Faisal: *Cybergrasp*. Cyberglove Systems. <http://www.cyberglovesystems.com/products/cybergrasp/overview>. Version: 2010. – [30.10.2010]
- [You u. a. 1999] YOU, Sua ; NEUMANN, Ulrich ; AZUMA, Ronald: Hybrid Inertial and Vision Tracking for Augmented Reality Registration. (1999), Integrated Media Systems Center, University of Southern California, Los Angeles
- [Youngblut u. a. 1996] YOUNGBLUT, Christine ; JOHNSON, Rob ; NASH, Sarah ; WIENCLAW, Ruth ; WILL, Craig: *Review of Virtual Environment Interface Technology*. Institute for Defense Analyses Paper P-3186. <http://www.hitl.washington.edu/scivw/IDA/>. Version: 1996. – [30.10.2010]
- [Zhang u. a. 1996] ZHANG, Lijian ; HELANDER, Martin ; DRURY, Colin: Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. In: *Human Factors* Bd. 38, 1996, S. 377–389

- [Zhang u. Chaffin 2006] ZHANG, Xudong ; CHAFFIN, Don: Digital human modeling for computer-aided ergonomics. In: KARWOWSKI, Waldemar (Hrsg.) ; MARRAS, William (Hrsg.): *The Occupational Ergonomics Handbook*, CRC Press, 2006
- [Ziegler u. Kücherer 2003] ZIEGLER, Peter-Michael ; KÜCHERER, Kirsten: Angereicherte Wirklichkeit - Augmented-Reality-Anwendungen in der Industrie. In: *c't magazin*. Hannover : Heise-Verlag, Ausgabe 16/ 2003, S. 80–83
- [Zürl u. Weiß 2008a] ZÜRL, Konrad ; WEISS, Armin: *Fingertracking: Tactile Feedback*. Advanced Realtime Tracking GmbH. <http://www.ar-tracking.de/Tactile-Feedback-Prototype.223.0.html>. Version: 2008. – [30.10.2010]
- [Zürl u. Weiß 2008b] ZÜRL, Konrad ; WEISS, Armin: *Optical tracking: General*. Advanced Realtime Tracking GmbH. <http://www.ar-tracking.de/Optical-tracking.33.0.html>. Version: 2008. – [30.10.2010]
- [Zwisler 1998] ZWISLER, Rainer: *Virtuelle Realität und die Rolle von Haptik*. Universität Regensburg, Institut für Psychologie. <http://www.zwisler.de/scripts/haptics/haptics.html>. Version: 1998. – [30.10.2010]

# Anhang

## A.1 Versuch zur Größenwahrnehmung - Fragebogen

Fragebogen A

Versuch zur Größenwahrnehmung in VR

Probandennummer:

Bitte geben Sie jeweils an, ob die Aussage zutrifft oder nicht.  
Sie können die gesamte Breite der Antwortmöglichkeiten nutzen.

Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten, es zählt nur Ihre Meinung.

Einige der Fragen ähneln sich - das ist aus statistischen Gründen notwendig.  
Wir bitten um Verständnis.

**Alle Angaben werden anonymisiert und nur zu statistischen Zwecken verwendet!**

---

**In der computererzeugten Welt hatte ich den Eindruck, dort gewesen zu sein ...**

überhaupt nicht         sehr stark  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Ich achtete noch auf die reale Umgebung.**

trifft gar nicht zu         trifft völlig zu  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Die virtuelle Welt erschien mir wirklicher als die reale Welt.**

trifft gar nicht zu         trifft völlig zu  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Ich hatte das Gefühl, nur Bilder zu sehen.**

trifft gar nicht zu         trifft völlig zu  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

---

**Meine reale Umgebung war mir nicht mehr bewußt.**

trifft gar nicht zu         trifft völlig zu  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Wie sehr glich Ihr Erleben der virtuellen Umgebung dem Erleben einer realen Umgebung?**

überhaupt nicht         vollständig  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Empfanden Sie das virtuelle Fahrzeuginterieur als real?**

hatte nicht den Eindruck         hatte den Eindruck  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Ich hatte nicht das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein.**

hatte nicht das Gefühl         hatte das Gefühl  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Wie real erschien Ihnen die virtuelle Umgebung?**

gar nicht real         vollkommen real  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Meine Aufmerksamkeit war von der virtuellen Welt völlig in Bann gezogen.**

trifft gar nicht zu         trifft völlig zu  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Wie bewußt war Ihnen die reale Welt, während sich Sie in der virtuellen Welt befanden (z.B. Geräusche, Raumtemperatur, andere Personen etc.)**

extrem bewußt         unbewußt  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Ich fühlte mich im virtuellen Raum anwesend.**

trifft gar nicht zu         trifft völlig zu  
-3 -2 -1 0 1 2 3

---

**Wie real erschien Ihnen die virtuelle Welt?**

wie eine vorgestellte         nicht zu unterscheiden  
Welt -3 -2 -1 0 1 2 3 von der realen Welt

---

## A.1 Versuch zur Größenwahrnehmung - Fragebogen

Fragebogen A

Versuch zur Größenwahrnehmung in VR

### Abschlussbefragung

Manchmal hat die Benutzung virtueller Welten gewisse Nebenwirkungen, die der Seekrankheit oder dem Unwohlsein beim Fliegen ähneln. Bitte geben Sie anhand der folgenden Liste an, ob und wie stark Sie solche Symptome während oder nach dem Aufsetzen des Head-Mounted-Display im Rahmen dieses Versuches verspürten.

<b>Symptom</b>	<i>nicht</i>	<i>leicht</i>	<i>etwas</i>	<i>schwer</i>
Allgemeines Unwohlsein	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kopfschmerzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Übelkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konzentrationsprobleme	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schwindelgefühl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Im Folgenden bitten wir um Angaben zu Ihrer Erfahrung mit dreidimensionaler computerbasierter Darstellungstechnik:

### Erfahrung mit dreidimensionaler computerbasierter Darstellung

nicht stereoskopische / keine Tiefenwirkung erzeugende Darstellung

<i>Nutzung</i>	<i>täglich</i>	<i>einige Male pro Monat</i>	<i>einige Male pro Jahr</i>	<i>nie</i>
3D CAD (Catia etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
grafikorientierte 3D Software (Maya, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3D Computerspiele	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
sonstige: .....	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

### Erfahrung mit Virtual Reality (VR) Technologie

stereoskopische (Tiefenwirkung erzeugende) Darstellung dreidimensionaler, computergenerierter Bilder

<i>Nutzung</i>	<i>täglich</i>	<i>einige Male pro Monat</i>	<i>einige Male pro Jahr</i>	<i>nie</i>
stereoskopische Darstellung am Bildschirm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
stereoskop. Wandprojektionen (z.B. Powerwall)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
CAVE (Wände=Projektionsflächen)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Head-Mounted-Displays	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
sonstige: .....	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Fragebogen A

Versuch zur Größenwahrnehmung in VR

**Angaben zur Person**

Zum Abschluss noch einige freiwillige persönliche Angaben.  
Alle Angaben werden anonymisiert und nur zu statischen Zwecken verwendet.  
Zutreffendes bitte ankreuzen.

- Alter
- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <input type="radio"/> 20-25 Jahre | <input type="radio"/> 46-50 Jahre        |
| <input type="radio"/> 26-30 Jahre | <input type="radio"/> 51-55 Jahre        |
| <input type="radio"/> 31-35 Jahre | <input type="radio"/> 56-60 Jahre        |
| <input type="radio"/> 36-40 Jahre | <input type="radio"/> 61 Jahre und älter |
| <input type="radio"/> 41-45 Jahre |  |

- Geschlecht
- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| <input type="radio"/> m | <input type="radio"/> w |
|-------------------------|-------------------------|

Fahrzeug: Mit welchem Fahrzeug haben sie im Verlauf des letzten Jahres den Großteil der von Ihnen gefahrenen km zurückgelegt?

Fahrzeug:

km-Leistung/Jahr:

- bekannte Augenprobleme
- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <input type="radio"/> Kurzsichtigkeit                                      | <input type="radio"/> Weitsichtigkeit |
| (Werte: links ..... /rechts ..... Dioptrien)                               |                                       |
| <input type="radio"/> eingeschränkte Fähigkeit zum dreidimensionalen Sehen |                                       |
| <input type="radio"/> sonstige   |                                       |

- während des Versuches benutzte Sehhilfen
- |                                     |
|-------------------------------------|
| <input type="radio"/> Brille        |
| <input type="radio"/> Kontaktlinsen |

Bemerkungen Ihrerseits:

Wir hoffen, Sie hatten Spaß an dem Versuch.  
Vielen Dank für die Teilnahme!

## A.2 Versuch zur Größenwahrnehmung - Auswertung

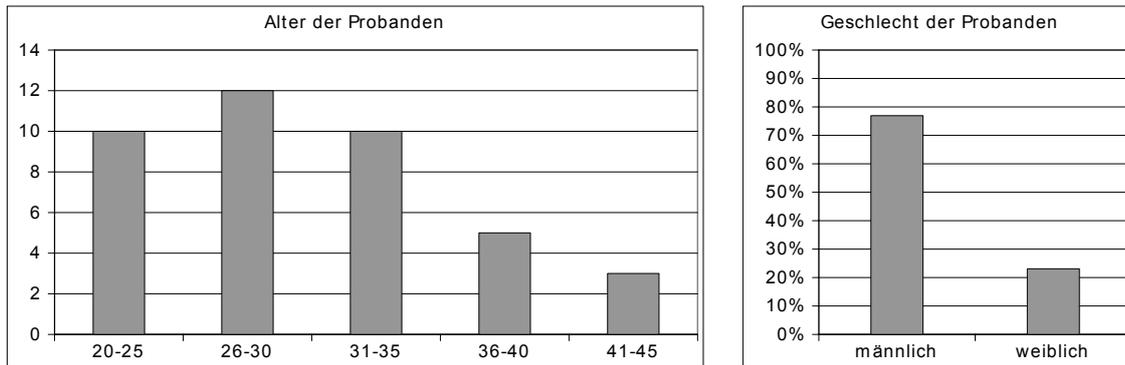


Abb. A.1: Verteilung der demographischen Daten der Probanden

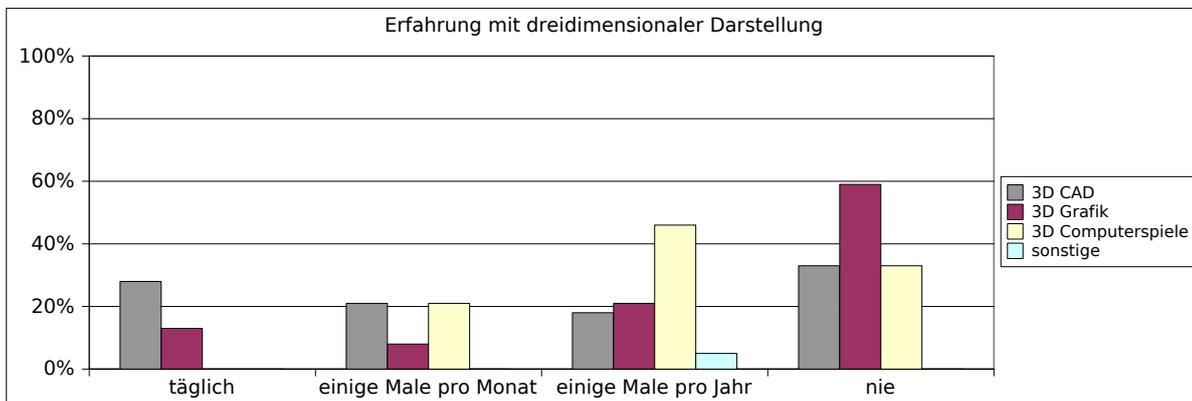


Abb. A.2: Erfahrung der Probanden mit dreidimensionaler Darstellung

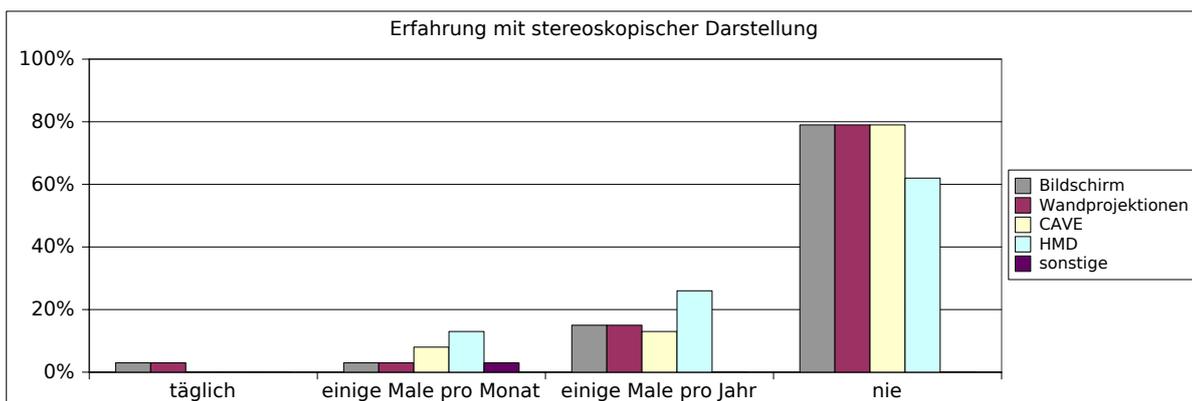


Abb. A.3: Erfahrung der Probanden mit stereoskopischer Darstellung

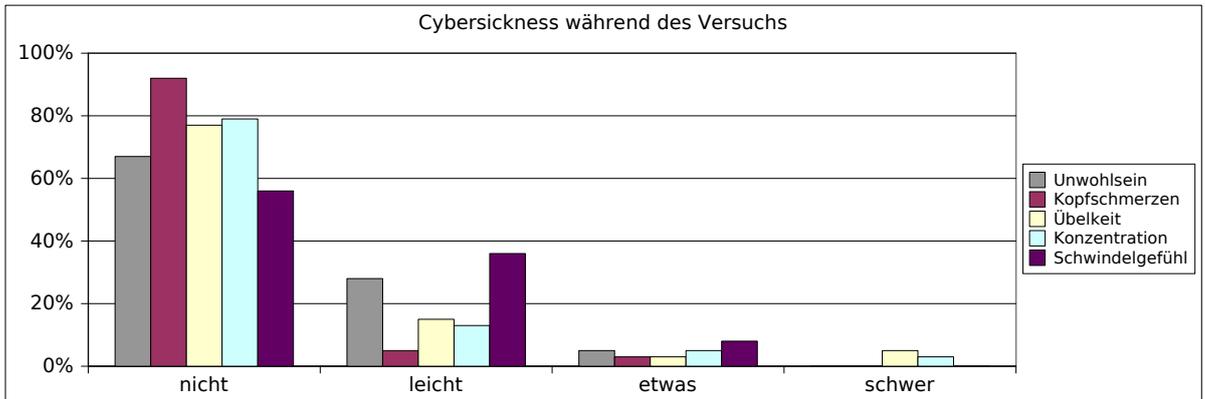


Abb. A.4: Grad der Kinetose der Probanden während des Versuchs

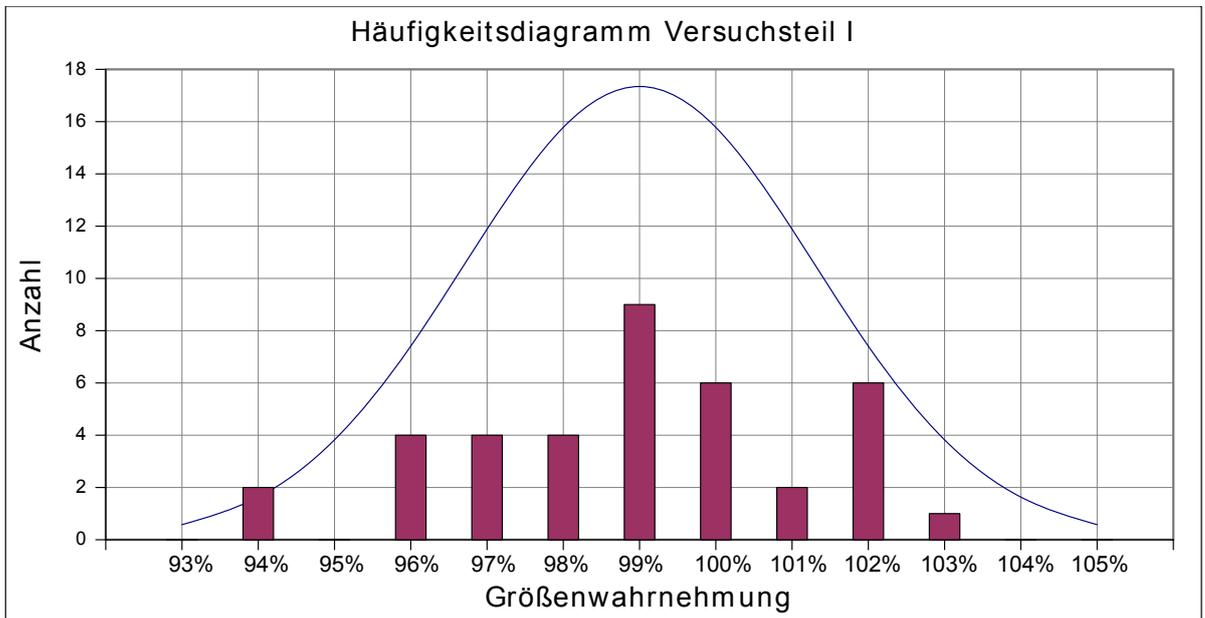


Abb. A.5: Verteilung der Ergebnisse aus Versuchsteil I

## A.3 Versuch zur Größenwahrnehmung - Ergebnis zur Präsenzbefragung

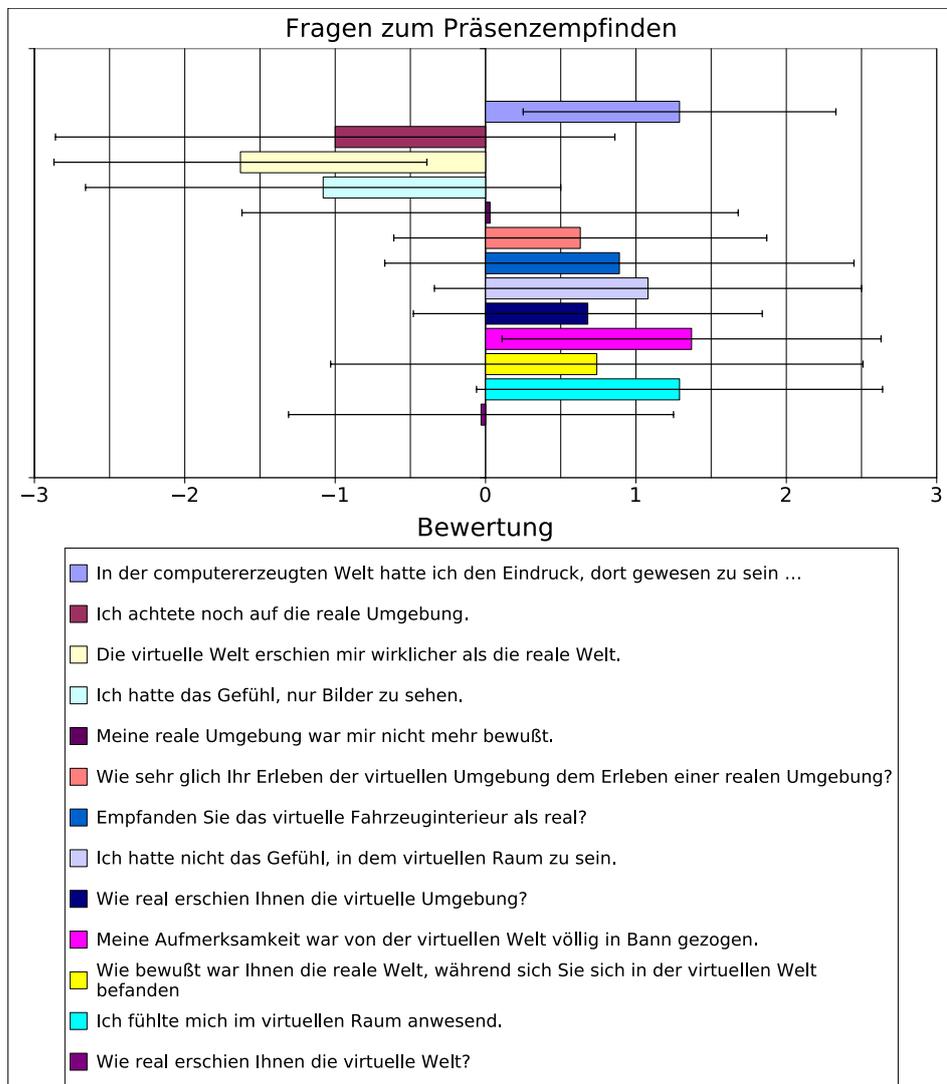


Abb. A.6: Übersicht der Ergebnisse der Präsenzbefragung aus dem Versuch zur Größenwahrnehmung

## B.1 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Fragebogen

### Versuch zur Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien

#### Fragen zur Person

**Geburtsjahr:**

19...

**Geschlecht:**

männlich

weiblich

**Was ist Ihr höchster Ausbildungsabschluss?**

- Lehre
- Fachhochschule/Universität
- Promotion
- Abitur
- mittlere Reife
- sonstiges

**Nutzen Sie eine Sehhilfe?**

nein

ja, ich trage sie momentan

ja, aber ich trage sie im Moment nicht

**Welche der folgenden Computeranwendungen nutzen Sie und wie oft? (Gemeint sind sowohl Erfahrungen in der jüngeren Vergangenheit wie auch aktuell)**

	täglich	mehrmals pro Woche	mehrmals pro Monat	mehrmals pro Jahr	nie
Text- und Bildverarbeitung	<input type="radio"/>				
CAD-Anwendungen	<input type="radio"/>				
HMD-Anwendungen	<input type="radio"/>				
CAVE	<input type="radio"/>				
Fahrsimulator	<input type="radio"/>				
andere VR-Anwendungen	<input type="radio"/>				
3D-Computerspiele	<input type="radio"/>				

**Die Nutzung und das Eintauchen in virtuelle Welten kann zu Unwohlsein oder anderen Nebenwirkungen führen. Ich bitte Sie daher, anzugeben, wie stark Sie folgende Symptome bei sich wahrnehmen bzw. wahrgenommen haben:**

	nicht	leicht	mittel	stark
Allgemeines Unwohlsein	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kopfschmerzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Übelkeit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Konzentrationsprobleme	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Schwindelgefühl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Versuch zur Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien**

**Fragen zur Immersion**

Bitte geben Sie jeweils an, ob die Aussage zutrifft oder nicht.

Sie können die gesamte Breite der Antwortmöglichkeiten nutzen.

Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten, es zählt nur Ihre Meinung.

Einige der Fragen ähneln sich - das ist aus statistischen Gründen notwendig.

Wir bitten um Verständnis.

**In der computererzeugten Welt hatte ich den Eindruck, dort gewesen zu sein.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Ich achtete noch auf die reale Umgebung.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Die virtuelle Welt erschien mir wirklicher als die reale Welt.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Ich hatte das Gefühl, nur Bilder zu sehen.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Meine reale Umgebung war mir nicht mehr bewusst.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Das Erleben der virtuellen Umgebung glich dem Erleben einer realen Umgebung.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Ich empfand das virtuelle Fahrzeuginterieur als real.**

trifft gar nicht zu    0   0   0   0   0   0   0    trifft völlig zu  
                                 -3   -2   -1   0   1   2   3

**Versuch zur Beurteilung ergonomischer Bewertungskriterien**

**Ich hatte nicht das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein.**

trifft gar nicht zu	0	0	0	0	0	0	0	trifft völlig zu
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

**Die virtuelle Umgebung erschien mir real.**

trifft gar nicht zu	0	0	0	0	0	0	0	trifft völlig zu
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

**Meine Aufmerksamkeit war von der virtuellen Welt völlig in Bann gezogen.**

trifft gar nicht zu	0	0	0	0	0	0	0	trifft völlig zu
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

**Während ich mich in der virtuellen Welt befand, war mir die reale Umgebung bewusst (z.B. durch Geräusche, Raumtemperatur, andere Personen etc.)**

trifft gar nicht zu	0	0	0	0	0	0	0	trifft völlig zu
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

**Ich fühlte mich im virtuellen Raum anwesend.**

trifft gar nicht zu	0	0	0	0	0	0	0	trifft völlig zu
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

**Die virtuelle Welt erschien real.**

trifft gar nicht zu	0	0	0	0	0	0	0	trifft völlig zu
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

## B.2 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Auswertung

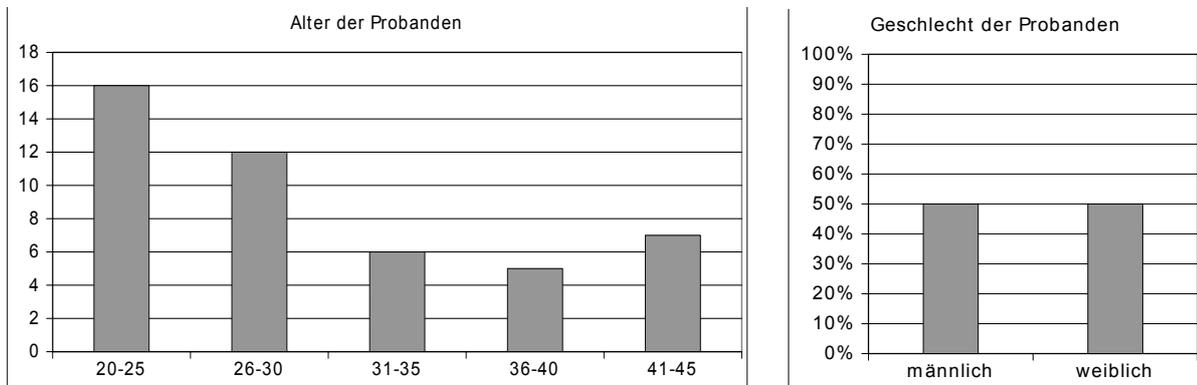


Abb. B.1: Verteilung der demographischen Daten der Probanden

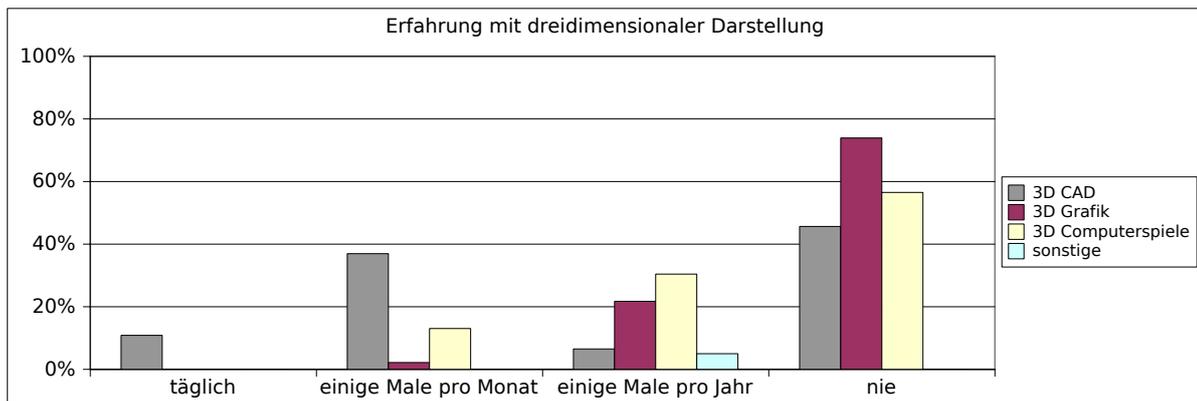


Abb. B.2: Erfahrung der Probanden mit dreidimensionaler Darstellung

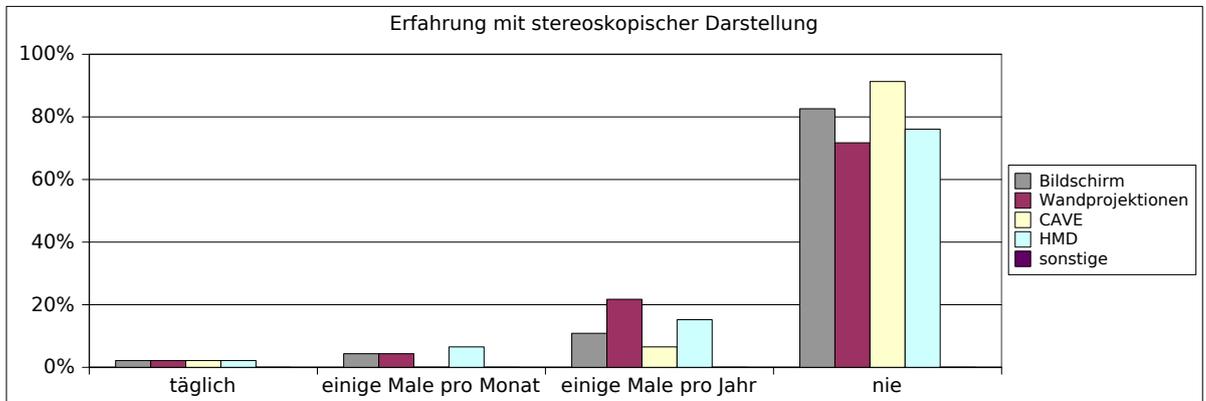


Abb. B.3: Erfahrung der Probanden mit stereoskopischer Darstellung

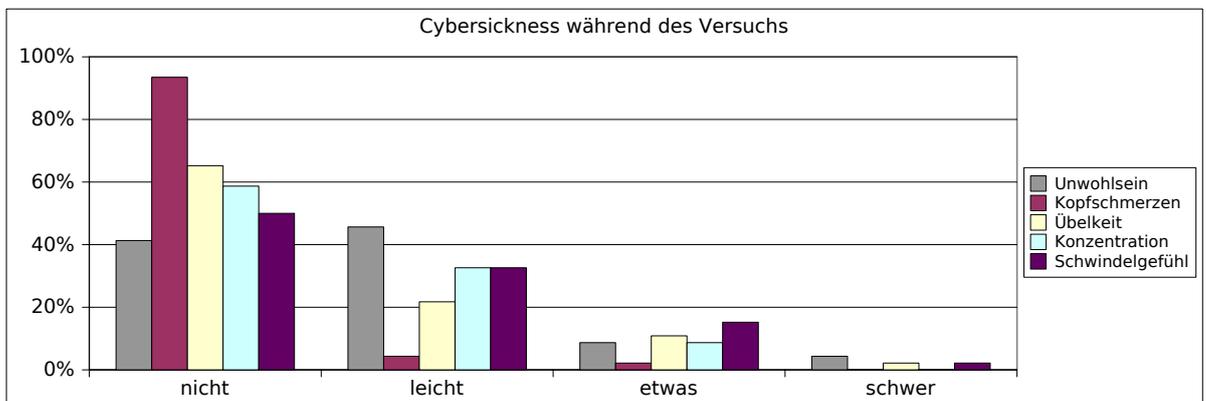


Abb. B.4: Grad der Kinetose der Probanden während des Versuchs

## B.3 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Probandenverteilung

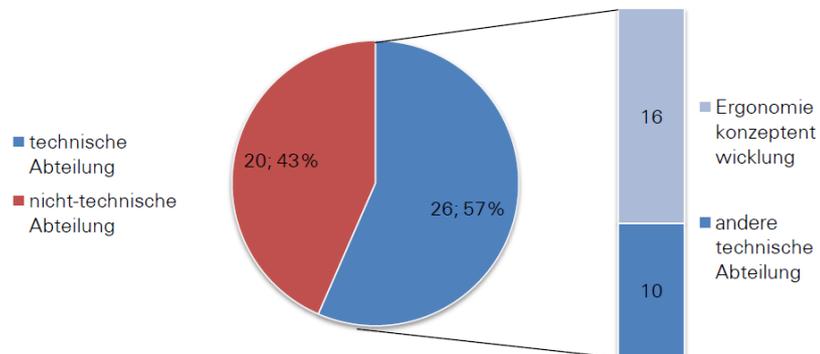


Abb. B.5: Verteilung der Probanden in der Studie zur Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien hinsichtlich technischer und nicht-technischer Tätigkeit

## B.4 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Übersicht der installierten Gestaltungsmängel

### Auffindbarkeit

Frage Nr.	Element	Gestaltungsmangel
Frage 1	Start-Stop-Taster	Verdeckung durch Blinkerhebel und verstärkte Lenkadspeiche
Frage 3	Blinkerhebel	Verdeckung durch Blinkerhebel und verstärkte Lenkadspeiche
Frage 6	El. Sitzverstellung	Verdeckung, Einschränkung des Greifraums
Frage 8	Handschuhkastenöffner	Verdeckung durch erweiterte Kontur der Instrumententafel
Frage 9	Handbremse	Verdeckung durch verschobene Mittelarmlehne
Frage 12	Außenspiegelverstellung	Verdeckung durch Türzuziehgriff, veränderte Positionierung
Frage 14	Zündschloss	Verdeckung durch Lenkrad
Frage 16	Cupholder	Verdeckung durch Schaltung und erweiterte Kontur an der Mittelkonsole
Frage 18	Kombi-Display	Verdeckung im oberen Bereich des Kombi-Displays durch veränderte Kontur der Hutze

### Erreichbarkeit

Frage Nr.	Element	Gestaltungsmangel
Frage 1	Handschuhkastenöffner	Außerhalb der Handreichweite des Fahrers, max. Reichweite: 825mm (DIN 33402-2, M95)
Frage 2	Türzuziehgriff	Außerhalb der Handreichweite des Fahrers, max. Reichweite: 825mm (DIN 33402-2, M95)
Frage 3	Tasten Sitzheizung	Außerhalb der Handreichweite des Fahrers, max. Reichweite: 825mm (DIN 33402-2, M95)
Frage 6	Lautstärkeregler	Außerhalb der Handreichweite des Fahrers, max. Reichweite: 825mm (DIN 33402-2, M95)
Frage 8	Cupholder/Becherhalter	Außerhalb der Handreichweite des Fahrers, max. Reichweite: 825mm (DIN 33402-2, M95)
Frage 11	Blinkerhebel	Wenn Hand am Lenkradkranz, ist Fingerlänge des Fahrers unzureichend um Markierung zu erreichen max. Länge des Zeigefingers: 84mm (DIN 33402-2, M95) max. Länge des Mittelfingers: 94mm (DIN 33402-2, M95) max. Handlänge: 208mm (DIN 33402-2)
Frage 12	El. Sitzverstellung	Einschränkung des Greifraums max. Handdicke: 20mm (DIN 33402-2, F05)
Frage 15	Drehsteller Lenkrad	Wenn Hand am Lenkradkranz, ist Daumenlänge des Fahrers unzureichend um Drehsteller zu erreichen. Verschiebung der Drehsteller in Richtung Lenkradmitte max. Daumenlänge: 76mm (DIN 33402-2)
Frage 18	Mittelarmlehne	Verschieben der Mittelarmlehne entsprechend Schulterhöhe im Sitzen und Oberarmlänge min. Schulterhöhe im Sitzen: 525mm (DIN 33402-2) max. Oberarmlänge: 360mm (DIN 33402-2)

### Bedienbarkeit

Frage Nr.	Element	Gestaltungsmangel
Frage 2	Handschuhkastenöffner	Verringerung der Eingriffstiefe
Frage 4	ESP-Taste	Reduzierung der Tastenbreite min. Fingerbreite Zeigefinger: 13mm (DIN 33402-2, F05)
Frage 6	Außenspiegelverstellung	Reduzierung Freigang / Zugänglichkeit min. Handbreite mit Daumen: 80mm (DIN 33402-2, F05)
Frage 8	Lichtdrehshalter	Reduzierung Höhe des Knebels
Frage 9	Cupholder/Becherhalter	Reduzierung Freigang / Zugänglichkeit
Frage 11	ACC-Hebel	Reduzierung Freigang / Zugänglichkeit
Frage 12	El. Fensterheber	Reduzierung Eingriffstiefe und Breite des Eingriffs min. Zeigefingerbreite: 13mm (DIN 33402-2, F05)
Frage 13	Handbremse	Reduzierung Freigang / Zugänglichkeit
Frage 16	Dreh-Drück-Steller	Reduzierung der Höhe des Elements, Drehbewegung nicht mehr möglich
Frage 17	Türarmauflage	Reduzierung der Länge der Armauflage min. Unterarmlänge Ellenbogen-Greifachse: 285mm (DIN 33402-2, F05) min. Unterarmlänge Ellenbogen-Handgelenk: 249mm (Size Germany, F05)

## B.5 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Übersicht zum Versuchsablauf

Randbedingung: Sitz und Lenkrad sind vor dem Versuch fest eingestellt und dürfen nicht durch die Versuchsperson verändert werden!

### Auffindbarkeit

In diesem Abschnitt geht es ausschließlich um die Auffindbarkeit der Elemente. Die Erreichbarkeit und Bedienbarkeit spielen keine Rolle. Soweit nicht anders durch den Versuchsleiter mitgeteilt, darf der Kopf bewegt werden. Der Oberkörper bleibt fest in der Lehne ohne Bewegung. Die Hände greifen das Lenkrad oder sind auf den Oberschenkel abzulegen. Die Auffindbarkeit wird durch Verdeckungen und ungünstige Positionen beeinträchtigt.

Die Fahrertür ist geschlossen!

<b>Frage 1</b>	Element	<b>Start-Stopp-Taster</b>
	Beurteilungssituation	Taste kann nicht gesehen werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die (Motor-) Start-Stopp-Taste auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 2</b>	Element	<b>Warnblinkschalter</b>
	Beurteilungssituation	Taste kann gesehen werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die Taste zur Betätigung der Warnblinkanlage auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 3</b>	Element	<b>Blinkerhebel</b>
	Beurteilungssituation	Weder Blinkerhebel noch Markierung können gesehen werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die gelbe Markierung am Blinkerhebel bzw. der Blinkerhebel auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben. Das Lenkrad ist in seiner Ausgangslage zu belassen.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 4</b>	Element	<b>Wischerhebel</b>
	Beurteilungssituation	Sowohl Wischerhebel als auch Markierung können gesehen werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die rote Markierung am Wischerhebel bzw. der Wischerhebel auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben. Das Lenkrad ist in seiner Ausgangslage zu belassen.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 5</b>	Element	<b>Fensterheber</b>
	Beurteilungssituation	Die elektrischen Fensterheber sind auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Sind die elektrischen Fensterheber auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 6</b>	Element	<b>Sitzverstellung</b>
	Beurteilungssituation	Die elektrischen Sitzverstellung ist nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die elektrische Sitzverstellung auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 7</b>	Element	<b>Türinnenbetätigung</b>
	Beurteilungssituation	Die Türinnenbetätigung ist auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die Türinnenbetätigung auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein

<b>Frage 8</b>	Element	<b>Handschuhkastenöffner</b>
	Beurteilungssituation	Der Handschuhkastenöffner ist nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist der Handschuhkastenöffner auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 9</b>	Element	<b>Handbremse</b>
	Beurteilungssituation	Die Handbremse ist nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die Handbremse auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 10</b>	Element	<b>Türzuziehgriff</b>
	Beurteilungssituation	Der Türzuziehgriff ist auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist der Türzuziehgriff auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 11</b>	Element	<b>Temperaturregler der Klimaanlage</b>
	Beurteilungssituation	Der Temperaturregler der Klimaanlage ist auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist der Temperaturregler der Klimaanlage auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 12</b>	Element	<b>Außenspiegelverstellung</b>
	Beurteilungssituation	Die Außenspiegelverstellung ist nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist die Außenspiegelverstellung auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 13</b>	Element	<b>Lichtdrehshalter</b>
	Beurteilungssituation	Der Lichtdrehshalter ist auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist der Lichtdrehshalter auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 14</b>	Element	<b>Zündschloß</b>
	Beurteilungssituation	Das Zündschloß ist nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist das Zündschloß auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 15</b>	Element	<b>Dreh-Drück-Steller</b>
	Beurteilungssituation	Der Dreh-Drück-Steller ist auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist der Dreh-Drück-Steller auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 16</b>	Element	<b>Cupholder/Becherhalter</b>
	Beurteilungssituation	Der Cupholder/Becherhalter ist nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Ist der Cupholder/Becherhalter auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 17</b>	Element	<b>Mitteldisplay</b>
	Beurteilungssituation	Das Mitteldisplay ist auffindbar, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Ist das Mitteldisplay auffindbar?
	Erläuterungen	Bitte zeigen Sie das Element, wenn Sie es gefunden haben.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 18</b>	Element	<b>Kombi-Display</b>
	Beurteilungssituation	Die Blinkersymbole im Kombi-Display sind nicht auffindbar, Gestaltungsmangel
	Frage	Sind die Blinkersymbole im Kombi-Display auffindbar?
	Erläuterungen	Die Anzeige muss ohne Kopf- und Oberkörperbewegung vollständig einsehbar sein.
	Antwort VP	o ja o nein

**Erreichbarkeit**

In diesem Abschnitt geht es ausschließlich um die Erreichbarkeit der abgefragten Elemente. Die Bedienbarkeit spielt keine Rolle. Soweit nicht anders durch den Versuchsleiter mitgeteilt, darf der Kopf bewegt werden. Der Oberkörper bleibt fest in der Lehne ohne Bewegung. Als erreichbar gilt ein Element, wenn man es mit den Fingerspitzen berühren kann. Das Erreichen des jeweiligen Elements ist zu demonstrieren.

Die Fahrertür ist geschlossen!

<b>Frage 1</b>	Element	<b>Handschuhkastenöffner</b>	
	Beurteilungssituation	Der Handschuhkastenöffner ist nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann der Handschuhkastenöffner erreicht werden?	
	Erläuterungen	Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen.	
	Antwort VP	o ja	o nein
	Fahrertüre öffnen		
<b>Frage 2</b>	Element	<b>Türzuziehgriff</b>	
	Beurteilungssituation	Der Türzuziehgriff kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann der Türzuziehgriff erreicht werden?	
	Erläuterungen	Kopf und der Oberkörper dürfen bewegt werden. Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen. Der Sitz wird nicht verlassen.	
	Antwort VP	o ja	o nein
	Fahrertüre schließen		
<b>Frage 3</b>	Element	<b>Sitzheizung</b>	
	Beurteilungssituation	Die Taste der Sitzheizung kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann die Taste der Sitzheizung erreicht werden?	
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren.	
	Antwort VP	o ja	o nein
<b>Frage 4</b>	Element	<b>Türinnenbetätigung</b>	
	Beurteilungssituation	Die Türinnenbetätigung kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann die Türinnenbetätigung erreicht werden?	
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren.	
	Antwort VP	o ja	o nein
<b>Frage 5</b>	Element	<b>Außenspiegelverstellung</b>	
	Beurteilungssituation	Die Außenspiegelverstellung kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann die Außenspiegelverstellung erreicht werden?	
	Erläuterungen	Kopf und der Oberkörper dürfen bewegt werden. Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen. Die Außenspiegelverstellung befindet sich auf der Armauflage in der Tür vor den el. Fensterhebern	
	Antwort VP	o ja	o nein
<b>Frage 6</b>	Element	<b>Lautstärkeregler</b>	
	Beurteilungssituation	Der Lautstärkeregler kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann der Lautstärkeregler erreicht werden?	
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren.	
	Antwort VP	o ja	o nein
<b>Frage 7</b>	Element	<b>Lichtdreheschalter</b>	
	Beurteilungssituation	Der Lichtdreheschalter kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann der Lichtdreheschalter erreicht werden?	
	Erläuterungen	Kopf und der Oberkörper dürfen bewegt werden. Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen.	
<b>Frage 8</b>	Element	<b>Cupholder/Becherhalter</b>	
	Beurteilungssituation	Der Cupholder/Becherhalter kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel	
	Frage	Kann der Cupholder/Becherhalter erreicht werden?	
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren. Der Cupholder befindet sich in der Mittelkonsole vor der Schaltung.	
	Antwort VP	o ja	o nein

<b>Frage 9</b>	Element	<b>Taster „RADIO“</b>
	Beurteilungssituation	Der Taster „RADIO“ kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Taster „RADIO“ erreicht werden?
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
Schaltung in Stellung Rückwärtsgang		
<b>Frage 10</b>	Element	<b>Schaltung</b>
	Beurteilungssituation	Es kann in den Rückwärtsgang geschaltet werden. Der Schaltknäuf wird in der Stellung rückwärtsgang erreicht, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Stellung Rückwärtsgang der Schaltung erreicht werden?
	Erläuterungen	Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen. Das Element gilt als erreicht, wenn die VP den Schaltknäuf mit der Handmitte erreichen kann.
	Antwort VP	o ja o nein
Schaltung in Ausgangsstellung 3. Gang		
<b>Frage 11</b>	Element	<b>Blinkerhebel</b>
	Beurteilungssituation	Die gelbe Markierung am Blinkerhebel kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die gelbe Markierung am Blinkerhebel erreicht werden?
	Erläuterungen	Die VP bewegt sich zum Lenkrad bis die gelbe Markierung sichtbar ist. Der Lenkradkranz ist mit beiden Händen in „Fahrschulhaltung“ (Handstellung 10- bzw. 14-Uhr) zu umfassen
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 12</b>	Element	<b>El. Sitzverstellung</b>
	Beurteilungssituation	Die el. Sitzverstellung kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die el. Sitzverstellung erreicht werden?
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 13</b>	Element	<b>El. Fensterheber</b>
	Beurteilungssituation	Der el. Fensterheber für die beiden vorderen Fenster kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der el. Fensterheber für die beiden vorderen Fenster erreicht werden?
	Erläuterungen	Die elektrischen Fensterheber für die vorderen Fenster sind mit dem Zeigefinger zu berühren.
	Antwort VP	o ja o nein
Mittelarmlehne entfernen/anheben		
<b>Frage 14</b>	Element	<b>Handbremse</b>
	Beurteilungssituation	Die Handbremse kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Handbremse erreicht werden?
	Erläuterungen	Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren. Der Griff ist mit der Handmitte zu berühren.
	Antwort VP	o ja o nein
Mittelarmlehne absenken		
<b>Frage 15</b>	Element	<b>Drehsteller Lenkrad</b>
	Beurteilungssituation	Die Drehsteller am Lenkrad Markierung können nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Können die Drehsteller am Lenkrad erreicht werden?
	Erläuterungen	Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen. Der Lenkradkranz ist mit beiden Händen in „Fahrschulhaltung“ (Handstellung 10- bzw. 14-Uhr) zu umfassen. Die Drehsteller sind mit den Daumen zu berühren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 16</b>	Element	<b>Dreh-Drück-Steller</b>
	Beurteilungssituation	Der Dreh-Drück-Steller kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Dreh-Drück-Steller erreicht werden?
	Erläuterungen	Die Schultern dürfen sich von der Sitzlehne lösen. Das Erreichen des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein

## B.5 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Übersicht zum Versuchsablauf

<b>Frage 17</b>	Element	<b>Armauflage</b>
	Beurteilungssituation	Die Armauflage kann erreicht werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Armauflage erreicht werden?
	Erläuterungen	Die Armauflage gilt als erreicht, wenn man sie mit dem Unterarm berühren kann. Größe und Zuschnitt spielen keine Rolle.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 18</b>	Element	<b>Mittelarmlehne</b>
	Beurteilungssituation	Die Mittelarmlehne kann nicht erreicht werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Mittelarmlehne erreicht werden?
	Erläuterungen	Die Armauflage gilt als erreicht, wenn man sie mit dem Unterarm berühren kann. Größe und Zuschnitt spielen keine Rolle.
	Antwort VP	o ja o nein

### Bedienbarkeit

In diesem Abschnitt geht es ausschließlich um die Bedienbarkeit der abgefragten Elemente. Deren Erreichbarkeit spielt keine Rolle. Die Versuchsperson darf sich bis zu dem abgefragten Element hin bewegen um es zu beurteilen. Ausschlaggebend für die Bedienbarkeit sind lokale Parameter wie Geometrie, Form, Größe und Zuschnitt des Elements und dessen unmittelbarer Umgebung. Als bedienbar gilt ein Element, wenn es problemlos bestimmungsgemäß manipuliert werden kann (z.B. Drehsteller: Drehbewegung). Die Bedienbarkeit des jeweiligen Elements ist zu demonstrieren.

Die Fahrertür ist geschlossen!

<b>Frage 1</b>	Element	<b>Wischerhebel – Intervallverstellung</b>
	Beurteilungssituation	Die Intervallverstellung am Wischerhebel kann bedient/manipuliert werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Intervallverstellung am Wischerhebel bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 2</b>	Element	<b>Handschuhkastenöffner</b>
	Beurteilungssituation	Der Handschuhkastenöffner kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Handschuhkastenöffner bedient werden?
	Erläuterungen	Der Handschuhkasten wird mit Daumen und ein oder zwei Fingern bedient. Die Bedienung ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 3</b>	Element	<b>Türzuziehgriff</b>
	Beurteilungssituation	Der Türzuziehgriff kann mit der ganzen Hand umfasst werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Türzuziehgriff mit der ganzen Hand umfasst werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 4</b>	Element	<b>ESP-Taste</b>
	Beurteilungssituation	Die ESP-Taste kann nicht alleine betätigt werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die ESP-Taste betätigt werden ohne eine andere Funktion auszulösen?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Die Taste ist mit dem Zeigefinger zu betätigen.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 5</b>	Element	<b>Türinnenbetätigung</b>
	Beurteilungssituation	Die Türinnenbetätigung kann bedient/manipuliert werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Türinnenbetätigung bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein

<b>Frage 6</b>	Element	<b>Außenspiegelverstellung</b>
	Beurteilungssituation	Die Außenspiegelverstellung kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Außenspiegelverstellung bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Der Drehsteller ist per Zufassunggriff von Daumen und einem weiteren Finger zu bedienen.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 7</b>	Element	<b>Temperaturregler der Klimaanlage</b>
	Beurteilungssituation	Der Temperaturregler der Klimaanlage kann bedient/manipuliert werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Temperaturregler der Klimaanlage bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 8</b>	Element	<b>Lichtdreheschalter</b>
	Beurteilungssituation	Der Lichtdreheschalter kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Lichtdreheschalter bedient werden?
	Erläuterungen	Der Lichtdreheschalter ist am Drehknebel zu drehen.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 9</b>	Element	<b>Cupholder/Becherhalter</b>
	Beurteilungssituation	Der Cupholder/Becherhalter kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Cupholder/Becherhalter bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Der vorhandene Becher ist aus dem Becherhalter zu entnehmen und hineinzustellen.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 10</b>	Element	<b>Start-Stopp-Taster</b>
	Beurteilungssituation	Der Start-Stopp-Taster kann bedient/manipuliert werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Start-Stopp-Taster bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 11</b>	Element	<b>ACC-Hebel</b>
	Beurteilungssituation	Der ACC-Hebel kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der ACC-Hebel bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	o ja o nein
<b>Frage 12</b>	Element	<b>el. Fensterheber</b>
	Beurteilungssituation	Die el. Fensterheber können nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Können die el. Fensterheber bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Die Fenster sollen geschlossen werden.
	Antwort VP	o ja o nein
Mittelarmlehne entfernen/anheben		
<b>Frage 13</b>	Element	<b>Handbremse</b>
	Beurteilungssituation	Die Handbremse kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann die Handbremse vollständig umfasst werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Der Griff soll ganz umfasst werden.
	Antwort VP	o ja o nein
Mittelarmlehne absenken		

## B.5 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Übersicht zum Versuchsablauf

<b>Frage 14</b>	Element	<b>Drehsteller Lenkrad</b>
	Beurteilungssituation	Der Drehsteller am Lenkrad kann bedient/manipuliert werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Drehsteller am Lenkrad bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Die Bedienung erfolgt mit dem Daumen. Die Handinnenflächen dürfen sich vom Lenkradkranz lösen.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 15</b>	Element	<b>Lenkrad</b>
	Beurteilungssituation	Der Lenkradkranz kann ganz umfasst werden, kein Gestaltungsmangel
	Frage	Kann das Lenkrad/der Lenkradkranz umfasst werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Der Lenkradkranz ist mit beiden Händen in „Fahrschulhaltung“ (Handstellung 10- bzw. 14-Uhr) zu umfassen.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 16</b>	Element	<b>Dreh-Drück-Steller</b>
	Beurteilungssituation	Der Dreh-Drück-Steller kann nicht bedient/manipuliert werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Dreh-Drück-Steller bedient werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren. Eine Drehbewegung ist auszuführen.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein
<b>Frage 17</b>	Element	<b>Türarmauflage</b>
	Beurteilungssituation	Der Unterarm kann nicht auf der Türarmauflage abgelegt werden, Gestaltungsmangel
	Frage	Kann der Unterarm vollständig auf der Türarmauflage abgelegt werden?
	Erläuterungen	Die Bedienung des Elements ist zu demonstrieren.
	Antwort VP	<input type="radio"/> ja <input type="radio"/> nein

## B.6 Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien - Ergebnis zur Präsenzbefragung

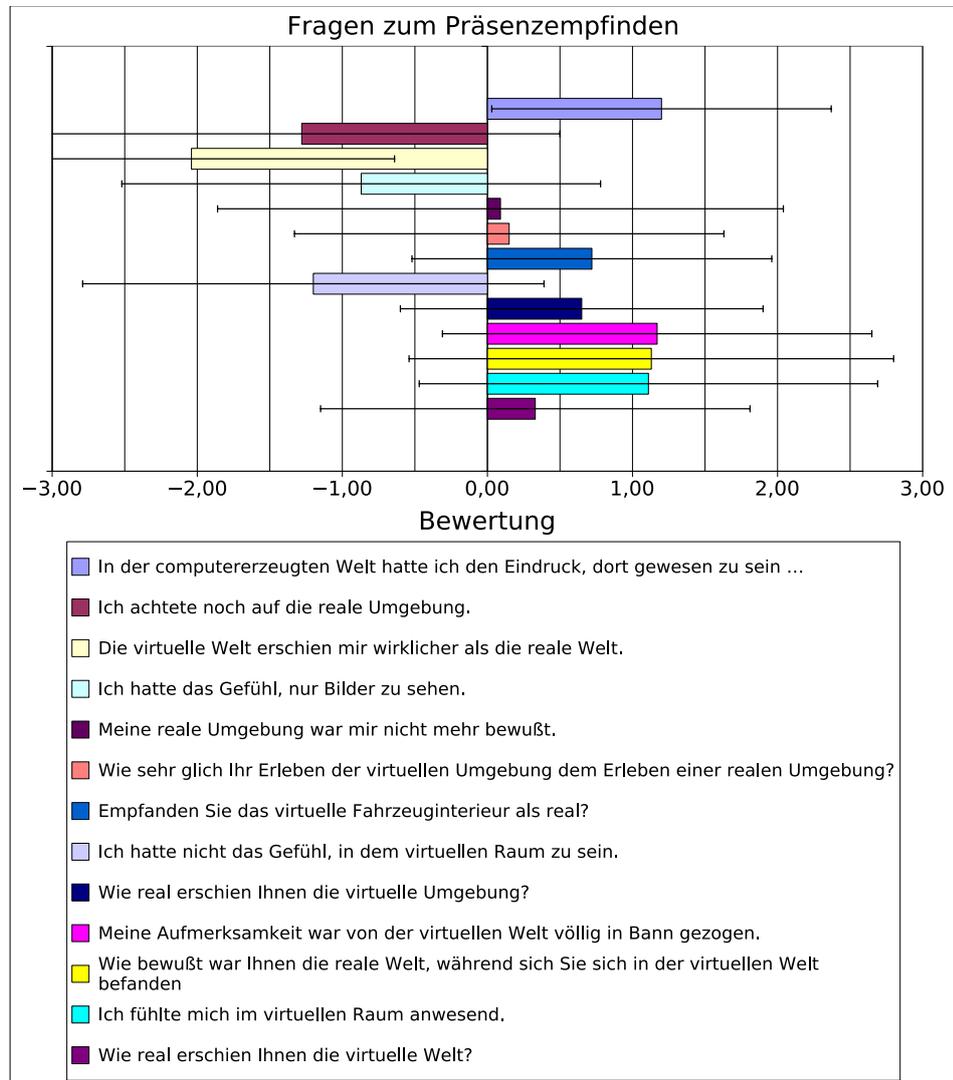


Abb. B.6: Übersicht der Ergebnisse der Präsenzbefragung aus dem Versuch zur Untersuchung ergonomischer Bewertungskriterien

## C.1 Untersuchung zur Sitzposition im Fahrzeug - Fragebogen

### Einschränkungen beim Finden der Sitzposition

16. Beeinträchtigungen: Wie stark hat sie der Helm beim Finden Ihrer optimalen Sitzposition beeinträchtigt?

(Markieren Sie Ihre Einschätzung auf der Skala durch einen vertikalen Strich)

Einfluss der Beeinträchtigung durch den Helm

17. Art der Beeinträchtigung      Wie hat sich die Beeinträchtigung auf ihre Sitzposition ausgewirkt?

---

---

---

---

18. Erfahrung HDM      Wie oft hatten sie bisher ein Head-Mounted-Display auf?

- noch nie                                       1-5 mal  
 mehr als 5 mal

19. Erfahrung HMD      Wie oft hatten sie bisher einen Integralhelm auf?

(Helm mit feststehendem Kinnschutz, z.B. beim Motorrad- oder Gokartfahren)

- noch nie                                       1-5 mal  
 mehr als 5 mal

## C.2 Untersuchung zur Sitzposition im Fahrzeug - Auswertung

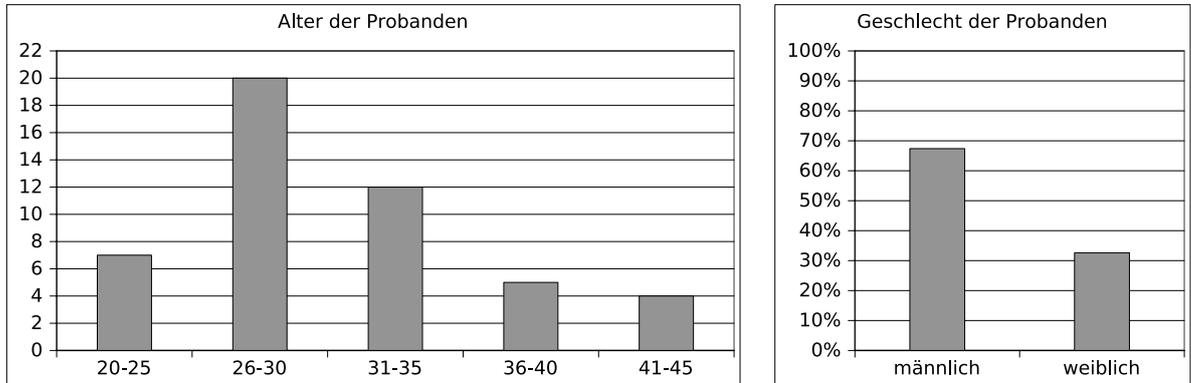


Abb. C.1: Verteilung der demographischen Daten der Probanden

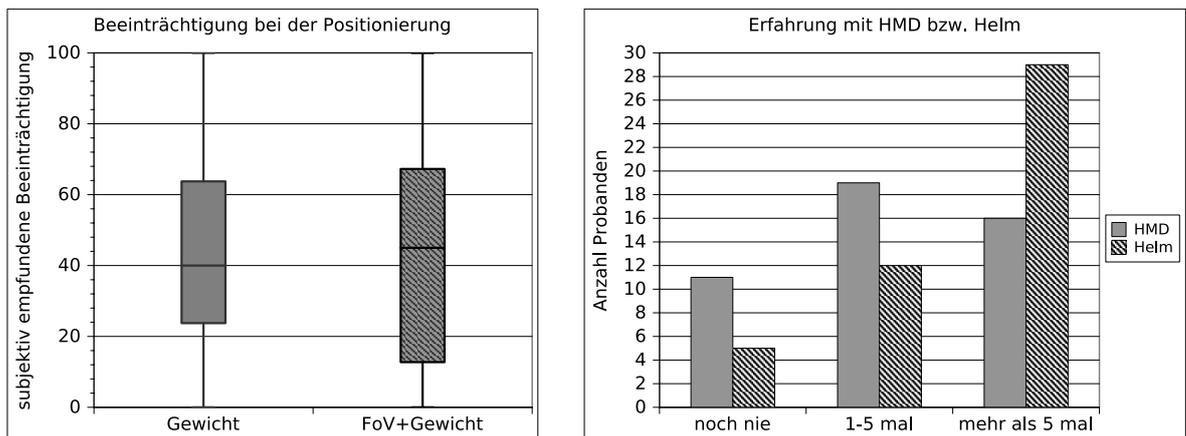


Abb. C.2: Subjektiver Beeinträchtigungsgrad der Probanden während des Versuchs (links) und Erfahrung der Probanden mit Head-Mounted Displays (rechts)

53 Prozent der Probanden aus Versuchsreihe II geben an, sie sind bei ihrer Positionierung im Fahrzeug eingeschränkt durch das FoV des Helms. 17 Prozent der Probanden aus den Versuchsreihen I und II geben an durch die verminderte Kopffreiheit bei ihrer Positionierung im Fahrzeug eingeschränkt zu sein. 7 Prozent der Probanden aus den Versuchsreihen I und II geben an durch das Gewicht des Helms bei ihrer Positionierung im Fahrzeug eingeschränkt zu sein.

Bei keinem der Einstellungsvorgänge während der Untersuchung trat eine Kollision zwischen Helm und Fahrzeughimmel auf.

## D.1 Studie zur Perzentilsimulation - Auswertung

Der Fragebogen der Studie zur Perzentilsimulation enthält einen Fragenteil zu den demographischen Daten der Versuchsteilnehmer und deren Präsenzepfinden analog zu den übrigen durchgeführten Studien (vgl. Anhang B.1). Dieser wird durch drei Fragen zur subjektiven Bewertung der Perzentilsimulation ergänzt, die Ergebnisse hierzu sind im Hauptteil der Arbeit zu finden (vgl. Abb. 4.9).

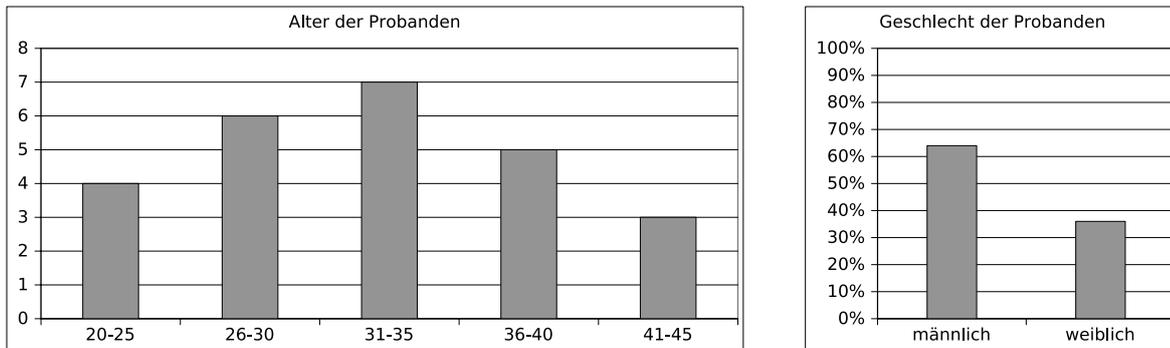


Abb. D.1: Verteilung der demographischen Daten der Probanden

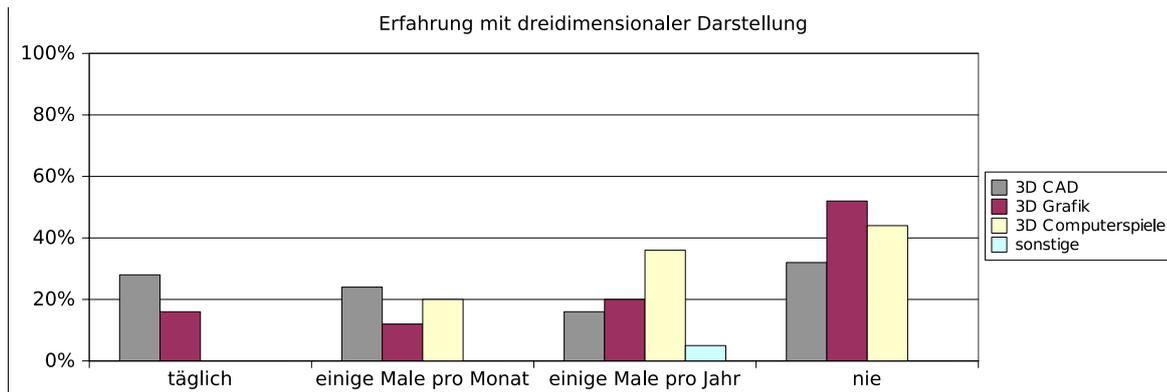


Abb. D.2: Erfahrung der Probanden mit dreidimensionaler Darstellung

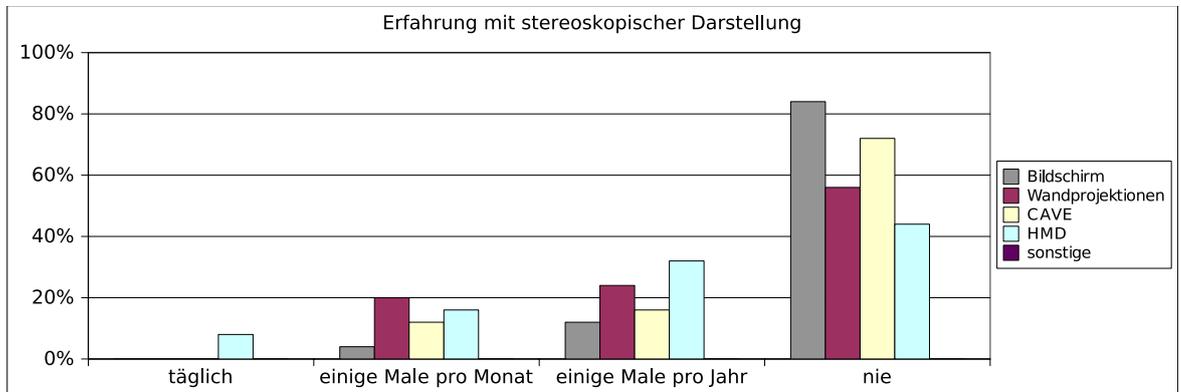


Abb. D.3: Erfahrung der Probanden mit stereoskopischer Darstellung

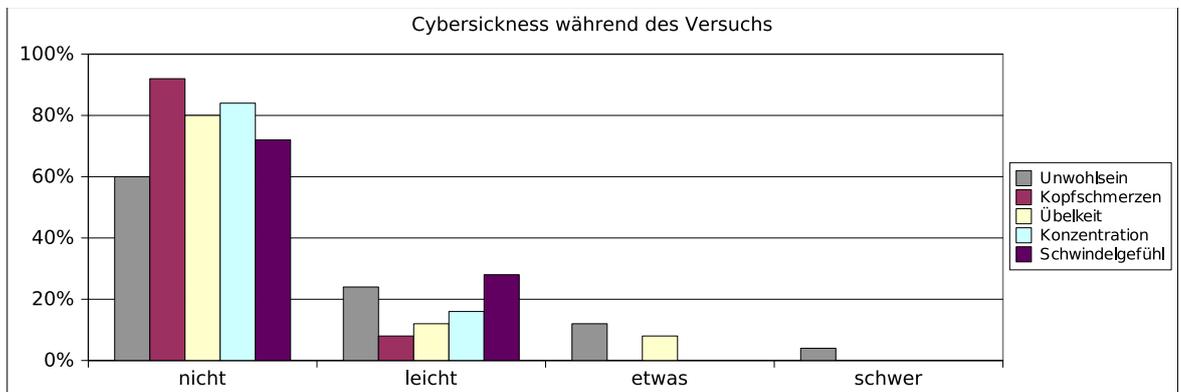


Abb. D.4: Grad der Kinetose der Probanden während des Versuchs

## D.2 Studie zur Perzentilsimulation - Ergebnis zur Präsenzbefragung

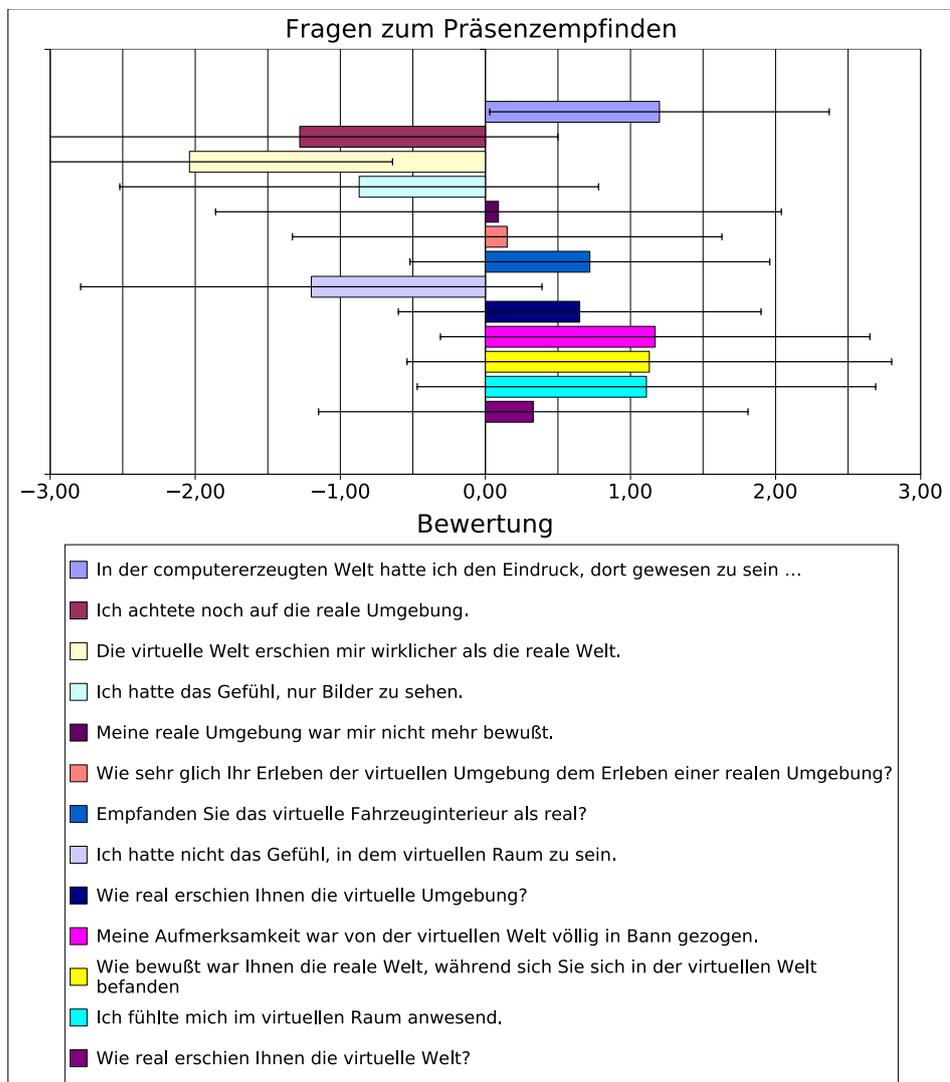


Abb. D.5: Übersicht der Ergebnisse der Präsenzbefragung aus dem Versuch zur Perzentilsimulation

## D.3 Ergebnis zur Präsenzbefragung in den durchgeführten Untersuchungen

Im Folgenden wird die Beantwortung der Fragen zum Präsenzepfinden im virtuellen Fahrerplatzmodell aus den Versuchen zur Größenwahrnehmung, zur Bewertbarkeit ergo-

nomischer Fragestellungen und zur Perzentilsimulation mittels Varianzanalyse statistisch untersucht.

Mit der Varianzanalyse wird überprüft, ob die Varianz der Messwerte zwischen den einzelnen Versuchen größer ist als die Varianz innerhalb einer Frage. Die Ergebnisse sind in Tabelle D.1 dargestellt. Für  $F < F_{krit}$  sind keine Unterschiede beim Präsenzepfinden für die entsprechende Frage in den unterschiedlichen Versuchen nachweisbar. Der Signifikanztest wird dabei über die Prüfgröße  $F$  vorgenommen. Das Signifikanzniveau wird auf .05 festgelegt.

Nur für Aussage Nr.8 des Präsenzfragebogens („Ich hatte nicht das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein.“) zeigt die Auswertung einen signifikanten Unterschied in der Bewertung. Hier treten signifikante Mittelwertsunterschiede bei der Bewertung dieser Aussage zum Präsenzepfinden im Versuch zur Größenwahrnehmung zu den beiden anderen Versuchen auf (jeweils  $p < .01$  für Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen und Perzentilsimulation). Für die Beurteilung des Präsenzepfindens hinsichtlich der Bewertung in Aussage Nr.8 zwischen den Versuchen zur Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen und der Perzentilsimulation können keine Unterschiede nachgewiesen werden ( $p=.23$ ). Allerdings widerspricht dies den Ergebnissen zur Aussage Nr.1 („In der computererzeugten Welt hatte ich den Eindruck, dort gewesen zu sein.“). Hier wird der Eindruck sich in der computererzeugten Umgebung zu befinden in allen drei Versuchen eindeutig positiv bewertet. Ein Missverständnis der Frage 8 im Versuch zur Größenwahrnehmung kann somit nicht ausgeschlossen werden. Für alle übrigen Aussagen zum Präsenzepfinden zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei genannten Versuchsreihen.

### D.3 Ergebnis zur Präsenzbefragung in den durchgeführten Untersuchungen

#### Auswertung der Fragen zum Präsenzepfinden

Frage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$GRW_{MW}$	1,29	-1,00	-1,63	-1,08	0,03	0,63	0,89	1,08	0,68	1,37	0,74	1,29	-0,03
$GRW_{STA}$	1,04	1,86	1,24	1,58	1,65	1,24	1,56	1,42	1,16	1,26	1,77	1,35	1,28
$SDT_{MW}$	1,25	-1,28	-1,98	-1,03	0,15	0,05	0,85	-1,15	0,85	1,25	1,25	1,15	0,53
$SDT_{STA}$	1,13	1,81	1,46	1,58	1,97	1,52	1,05	1,63	1,12	1,48	1,66	1,55	1,36
$PRZ_{MW}$	1,17	-1,50	-1,50	-1,17	0,00	0,56	0,39	-0,67	0,06	1,17	0,50	1,28	0,22
$PRZ_{STA}$	1,29	1,72	1,25	1,79	2,00	1,62	1,85	1,53	1,95	1,15	1,92	1,23	1,80
$F\text{-Wert}$	0,10	0,53	1,57	0,28	0,02	1,32	0,71	24,18	1,48	0,25	1,02	0,19	0,61
$p$	.91	.59	.21	.76	.98	.27	.49	<.01	.23	.78	.36	.83	.55

$F_{Krit} = 3,09$  (kritischer Wert für Prüfgröße F)

GRW: Ergebnisse aus dem Versuch zur Größenwahrnehmung,

SDT: Ergebnisse aus dem Versuch zur Bewertbarkeit ergonomischer Inhalte,

PRZ: Ergebnisse aus dem Versuch zur Perzentilsimulation,

$MW$ : mittlere Bewertung,

$STA$ : Standardabweichung der Bewertung

Tab. D.1: Einfaktorielle Varianzanalyse der Ergebnisse aus den Immersionsfragebögen aus den Versuchen zur Größenwahrnehmung, zur Bewertbarkeit ergonomischer Fragestellungen und zur Perzentilsimulation