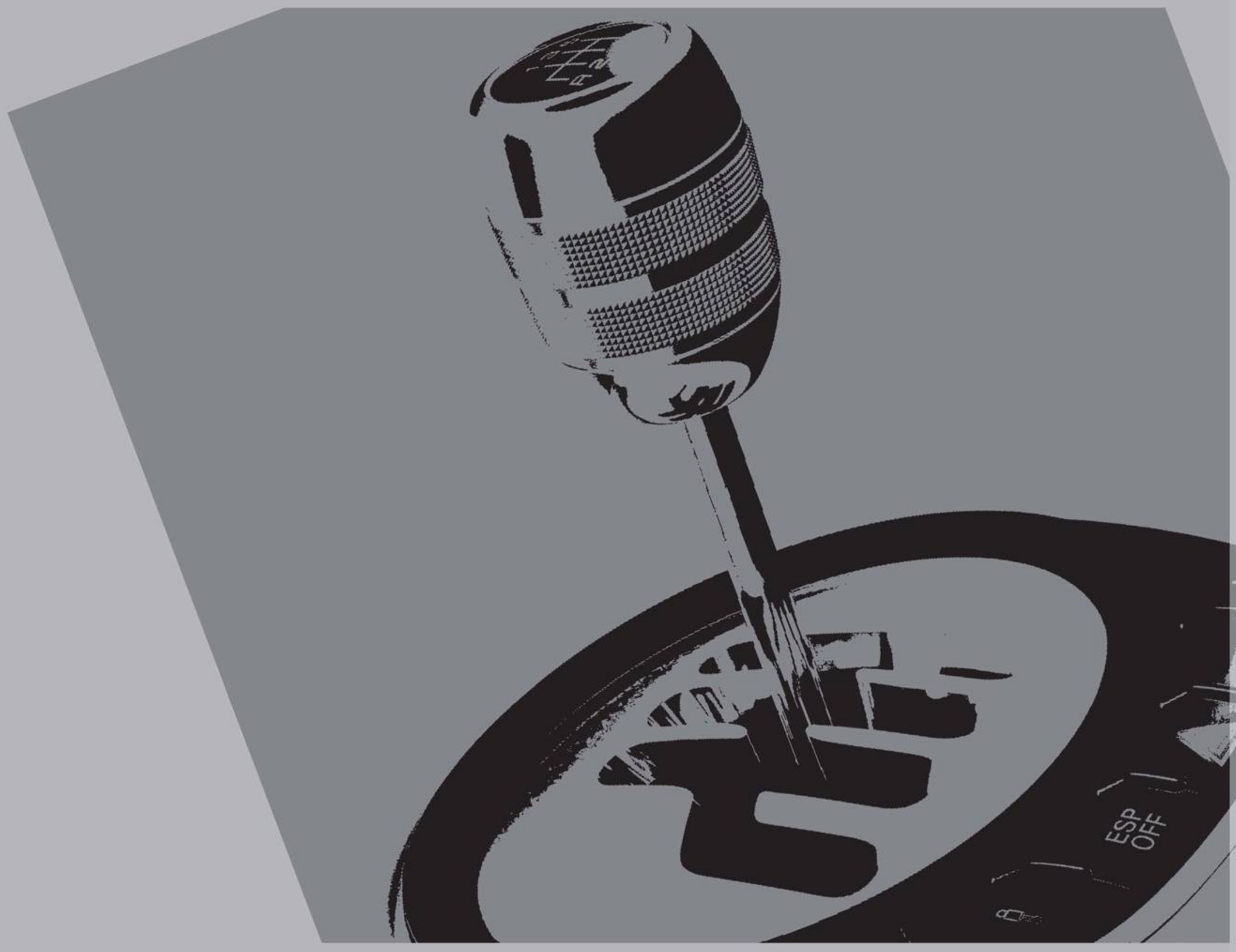
Audi Dissertationsreihe

Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen

Till Voß



INGOLSTADT INSTITUTE DER TU MÜNCHEN

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Ergonomie

Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen

Till Voß

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.-Ing. Bernd Heißing
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb, i.R.
	2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Rigoll

Die Dissertation wurde am 08.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.11.2008 angenommen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009
Zugl.: (TU) München, Univ. Diss., 2008

978-3-86727-895-9

Audi Dissertationsreihe, Band 12

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2009
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-895-9

Danksagung

Auch wenn die Promotion letztendlich die Leistung eines Einzelnen ist, so haben doch viele Personen zur ihrer Entstehung beigetragen, Ihnen soll an dieser Stelle gedankt werden.

Dazu gehört ganz besonders mein Doktorvater und Ordinarius des Lehrstuhls für Ergonomie, Herr Prof. H. Bubb, der die Betreuung des Projektes übernommen hat und immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Herrn Prof. Rigoll sei an dieser Stelle für die Übernahme des Zweitgutachtens, sowie für sein Interesse an meiner Arbeit gedankt.

Des weiteren geht mein Dank an meine beiden Betreuern bei Audi. Einerseits an Wolfram Remlinger, der das Projekt initiierte und auf den Weg brachte. Anderseits an Christian Mergl, der dabei half es zu einem glücklichen Abschluss zu bringen.

Weiterhin Danke ich Christoph Frandrup und André Rückert, ohne sie hätte die „Virtuelle Sitzkiste“ nicht ihren funktionalen Reifegrad und ihre technische Stabilität erreicht. Ebenso geht mein Dank an Melanie Staebler, die mich sowohl bei den Versuchen als auch im Tagesgeschäft unterstützt hat.

Bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen der Abteilung Ergonomiekonzepte und Ihrem Leiter Jürgen Meurle für die Unterstützung und das gute Arbeitsklima.

Darüber hinaus möchte ich all meinen Freuden für den regen Gedankenaustausch und die Ratschläge abseits des Arbeitsplatzes danken.

Für die Durchsicht des Manuskriptes und ihre wertvollen Kommentare geht mein Dank an Wibke und Wünne Voß, Gudrun Nitschke und Stefan Lorenz.

Ohne den Rückhalt und die Unterstützung meiner Familie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihnen möchte ich daher in ganz besonderem Maße danken.

Kurzfassung

Der steigende Anteil von virtuellen Entwicklungsmethoden in der Industrie führt zu der Frage, inwieweit die mit den virtuellen Methoden erzielten Ergebnisse mit denen der klassischen Methoden übereinstimmen. Denn die Sicherstellung der Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen ist eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von virtuellen Methoden im Entwicklungsprozess.

Diese Fragestellung kann durch einen Vergleich zwischen der menschlichen Wahrnehmung in virtueller und in realer Umgebung beantwortet werden. Für diesen Vergleich wurden zwei Versuchsszenarien entwickelt. Einerseits wurde die Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung untersucht, woraus sich Rückschlüsse auf die Qualität der virtuellen Umgebung ableiten lassen. Anderseits wurden ergonomische Fragestellungen in einem Fahrzeugmodell bewertet, um zu prüfen, inwieweit individuelle und subjektive Parameter in virtueller Umgebung beurteilt werden können.

Der Vergleich der Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung zeigt keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen in virtueller und in realer Umgebung. Weiterhin lassen sich aus den Ergebnissen Richtlinien für Kalibrierung von Hardware Bauteilen als haptisches Feedback ableiten. Diese können bei der Gestaltung von virtuellen Umgebungen verwendet werden. Bei der Bewertung von ergonomischen Fragestellungen in einem Fahrzeugmodell zeigt der Vergleich, dass die Ergebnisse weitestgehend übereinstimmen.

Insgesamt zeigen alle Ergebnisse, dass die Qualität der verwendeten virtuellen Umgebung ausreicht, um im Entwicklungsprozess eingesetzt zu werden.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen bei dem verwendeten Head-Mounted Display einen erheblichen Verbesserungsbedarf auf. Da auch die am Markt erhältlichen Systeme diesen Anforderungen nicht vollständig genügen, wurde ein Konzept für ein ergonomisch optimales Head-Mounted Display erarbeitet. Aus den Anforderungen wurden unter Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit entsprechende Gestaltungsrichtlinien abgeleitet und anschließend in einem Konzept zusammengefasst.

Abstract

The rising number of virtual development methods used in the industry leads to the question how far the results of virtual development methods achieve the same results as classic development methods.

To answer this question, two experiments were developed and realized. At first, the visual and the haptic perception was researched in a virtual and a real environment. In a second step, ergonomic problems in a vehicle model were investigated also in both environments. This experiment should show how far individual and subjective parameters can be identified.

The results of both methods are near to equal in the virtual and the real environment. So, the quality of the used virtual reality system is sufficient enough to be used in the development process. Further on, it is possible to identify factors for the future design of virtual reality systems.

The experiments show that the used HMD has several characteristics which can be improved. To address these issues, a new concept for an HMD with optimal ergonomic characteristics was developed. This concept combines ergonomic guidelines and technical feasibility.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINFÜHRUNG 3

1.1 Grundbegriffe der Virtual Reality 4

1.2 Anwendungsfelder für Virtual Reality 7

1.3 Stand der Forschung und Zielsetzung 10

1.4 Vorgehensweise und Methodik 16

1.5 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit 20

2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN 22

2.1 Die Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung 22

2.1.1 Versuche in virtueller Umgebung 22

2.1.2 Versuche in realer Umgebung 35

2.1.3 Zusammenführung der Ergebnisse 37

2.1.4 Diskussion 44

2.2 Vergleich der Bewertung eines Fahrzeugmodells in realer und in virtueller Umgebung 46

2.2.1 Konzeption 47

2.2.2 Versuchsaufbau und -durchführung 48

2.2.3 Zusammenführen der Ergebnisse 50

2.2.4 Diskussion 53

2.3 Zusammenfassung 55

3 KONZEPTION EINES ERGONOMISCH OPTIMIERTEN HEAD-MOUNTED DISPLAYS 57

3.1 Definition der ergonomischen Anforderungen und Auswahl der Komponenten 61

3.1.1 Allgemeine Betrachtungen zu Konzept und Design 61

3.1.2 Bildeigenschaften 63

3.1.3 Microdisplay 66

3.1.4 Tragegestell 69

3.2 Verschiedene Ansätze für die Konzeption eines ergonomisch optimierten Head-Mounted Displays 75

3.2.1 Bilderzeugung vor dem Auge 75

3.2.2 Bilderzeugung hinter dem Ohr 76

3.2.3 Bilderzeugung vor dem Ohr 77

3.3 Vorstellung des erarbeiteten Konzepts 78

3.4 Bewertung des Konzepts 80

3.5 Umsetzung und Entwicklungsperspektiven 82

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 84

5 LITERATUR 88

ANHANG 93

Anhang A-1: Fragebögen 93

Anhang A-2: Ergebnisse der Fragebögen 101

Anhang B: Ergebnisse der Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung 110

Anhang C: Ergebnisse des Vergleiches der Bewertung eines Fahrzeugmodells in virtueller und in realer Umgebung 111

Anhang D: Verwendetet Systeme 112

Anhang E: Verwendete Hilfsmittel 113

1 Einführung

Die Entwicklung von Produkten ist heutzutage anspruchsvoller denn je, neben der stetig wachsenden Komplexität sehen sich die Hersteller globaler Konkurrenz und einem steigenden Kostendruck ausgesetzt. Um den Entwicklungsprozess zu verkürzen, wird in der Produktentwicklung zunehmend auf virtuelle Techniken gesetzt.

Der Einsatz von neuen Entwicklungswerkzeugen dieser Art erfordert eine genaue Analyse der Auswirkungen auf den Anwender und dessen Arbeit. Im Gegensatz zu klassischen Desktopanwendungen sind Virtual-Reality Systeme wesentlich komplexer, umso wichtiger ist eine ergonomische Gestaltung der virtuellen Umgebung.

Auch in der Automobilindustrie werden für die Entwicklung von neuen Fahrzeugmodellen zunehmend virtuelle Techniken eingesetzt (Oehlschlaeger, 2003). Die Verwendung von virtuellen Umgebungen bei der Visualisierung von Innenraumkonzepten bietet viele Vorteile gegenüber den bisherigen, hardwarebasierten Verfahren und ist ein weiterer Schritt zur vollständigen virtuellen Produktentwicklung. Um in Zukunft schneller und günstiger Innenraumkonzepte darzustellen, wurde bei der AUDI AG das Visualisierungs- und Bewertungswerkzeug „Virtuelle Sitzkiste“ entwickelt.

Mit diesem Werkzeug ist es dem Anwender möglich, das virtuelle Fahrzeugmodell zu bewerten. Als Interaktionsmittel stehen dabei Datenhandschuhe und ein virtuelles Menschmodell zur Verfügung. Visualisiert wird die virtuelle Umgebung über ein Head-Mounted Display.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie sich die Nutzung eines solchen Systems auf die Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit auswirkt. Schließlich soll der Anwender in der virtuellen Umgebung die gleiche Entscheidung treffen wie in der realen Umgebung. Die Beantwortung dieser Frage bildet die Basis für die produktive Anwendung von virtuellen Entwicklungswerkzeugen und ist eine Voraussetzung für die Prozessintegration.

Die Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit lässt sich dabei zu zwei Fragen zusammenfassen:

- Beurteilt der Anwender eine Fragestellung in virtueller Umgebung genauso wie in realer?
- Trifft der Anwender in beiden Umgebungen die gleiche Entscheidung?

Um diese Fragen zu beantworten, wird hier die menschliche Wahrnehmung in virtueller Umgebung mit der in realer Umgebung verglichen.

1.1 Grundbegriffe der Virtual Reality

Der Begriff Virtual Reality (VR, dt. Virtuelle Realität) ist zwar in sich widersprüchlich, bedeutet jedoch allgemein „erdachte“ oder „mögliche Realität“ und beschreibt eine computergenerierte Nachbildung einer realen Umgebung. Diese Nachbildung wird dann als virtuelle Umgebung bezeichnet. Eine deutliche Prägung erlangte der Begriff Ende der 1980er Jahre durch den amerikanischen Computerwissenschaftler Jaron Lanier. Von diesem Zeitpunkt an begannen sich Anwendungen, die auf Virtual Reality basierten, immer weiter zu verbreiten. Dies wurde insbesondere durch die schnelle Entwicklung der technischen Komponenten der VR-Systeme begünstigt.

Benachbarte Themenfelder der VR sind Augmented Reality und Extended Reality (dt. erweiterte Realität), hier wird mit einer Vermischung bzw. Überlagerung von realer und virtueller Umgebung gearbeitet. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsfelder und der oftmals unterschiedlichen Deutung der Definitionen sind die Grenzen zwischen den einzelnen Themenfeldern fließend.

Diese Arbeit und die darin behandelten Fragestellungen beziehen sich auf VR-Systeme, die eine komplett virtuell visualisierte Umgebung zur Verfügung stellen und um haptische Bedienelemente erweitert sind.

In Abbildung 1 wird der Zusammenhang zwischen realer Umwelt, menschlicher Wahrnehmung und dem VR-System gezeigt.

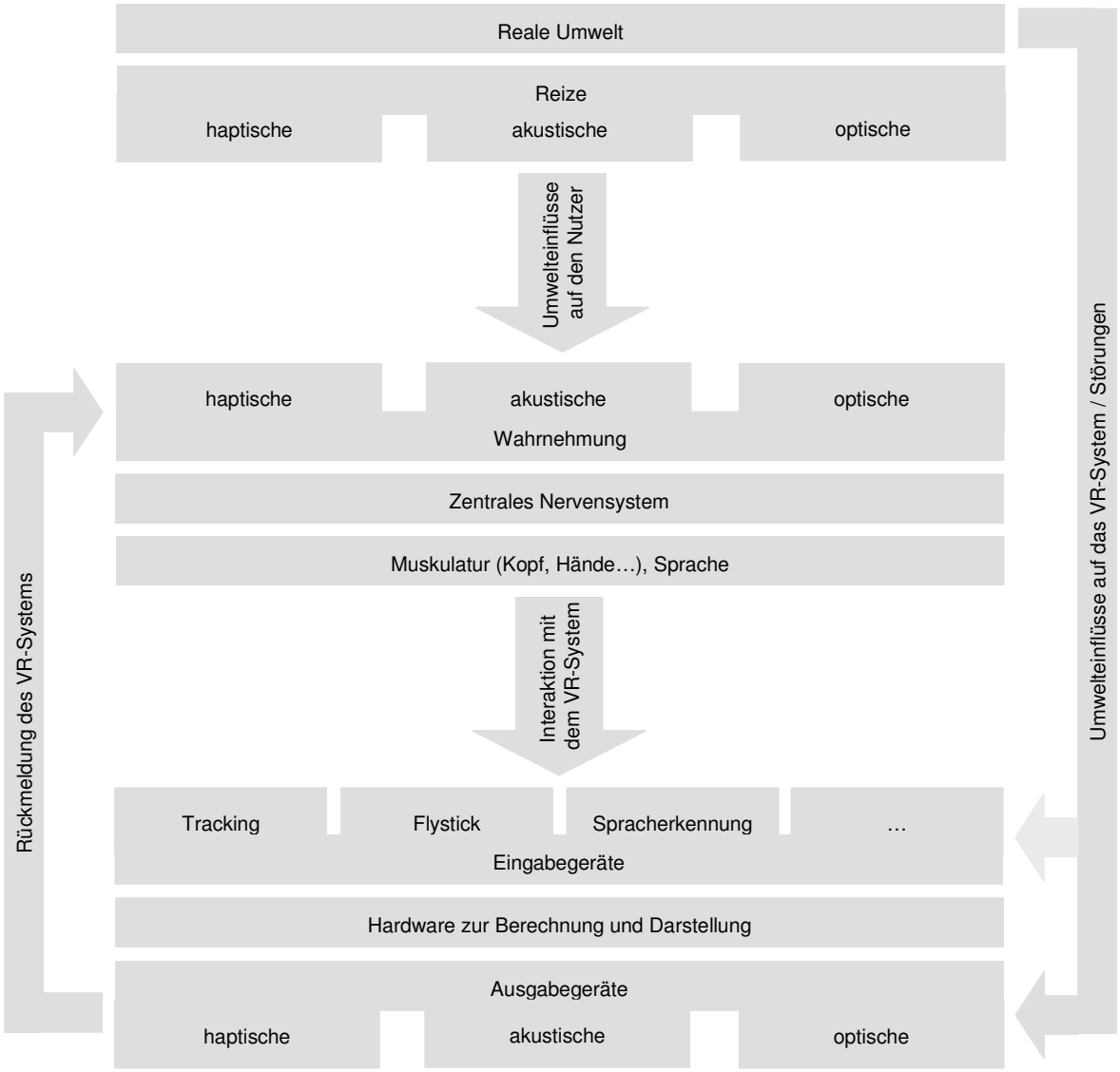


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Umwelt, Mensch und VR-System nach Engstler (2005), (vgl. auch Schmidtke, 1993).

Um eine reale Umgebung virtuell nachbilden zu können, muss das VR-System einige Grundanforderungen erfüllen (vgl. auch Hofmann, 2002):

- Eine korrekte räumliche Darstellung der virtuellen Umgebung inklusive der Abstände und Proportionen der virtuellen Objekte zueinander.
- Möglichkeiten zur Interaktion mit der gesamten virtuellen Umgebung bzw. einzelnen Objekten.
- Stereoskopische Darstellung der virtuellen Umgebung.
- Visualisieren der Interaktion sowie der Abläufe in der virtuellen Umgebung in Echtzeit.
- Bereitstellen eines haptischen Feedbacks.

Während die korrekte räumliche Darstellung weitestgehend sichergestellt ist, stößt die Computertechnik bei der Visualisierung in Echtzeit noch häufig an ihre Grenzen. Auch die Simulation von haptischem Feedback ist momentan nur auf einem niedrigen Realitätsniveau möglich (Schwanecke, 2004).

An dieser Stelle sollen nun drei Begriffe eingeführt werden, mit denen die Qualität einer virtuellen Umgebung beschrieben werden kann:

- Immersion (von lat. *immergere*: eintauchen, versenken),
- Realitätsnähe,
- Präsenz.

Während die Immersion den Grad des Eintauchens in die virtuelle Umgebung beschreibt, bezeichnet die Realitätsnähe den Grad des Realismus der virtuellen Darstellung. Die Präsenz wird dabei hauptsächlich von diesen beiden Faktoren bestimmt. Hofmann (2002) definiert Präsenz als den Eindruck des Anwenders, sich physisch in der von dem VR-System erzeugten virtuellen Umgebung zu befinden. Die Präsenz gilt dabei als eine Art Qualitätskriterium für eine virtuelle Umgebung (Steuer, 1992). So können der Präsenz einzelne VR-systemspezifische Faktoren (vgl. Tabelle 1) zugeordnet werden, mit denen die Qualität des VR-Systems bewertet werden kann. In Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen Immersion, Realitätsnähe und Präsenz sowie ihr Einfluss auf die visuelle Raumwahrnehmung dargestellt.

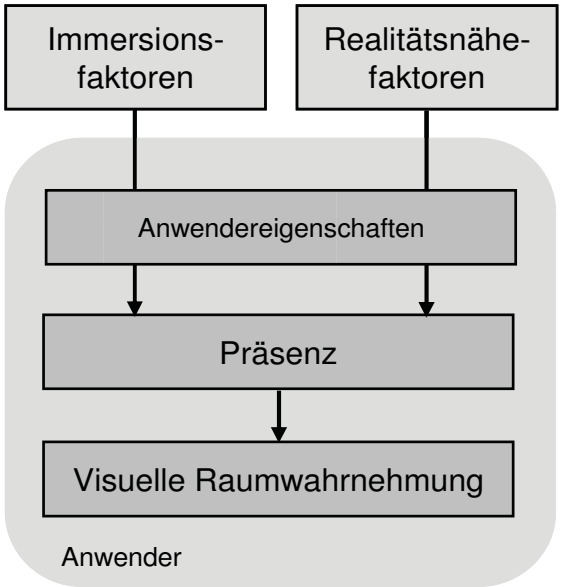


Abbildung 2: Zusammenhang von Immersion, Realitätsnähe, Präsenz und visueller Raumwahrnehmung nach Hofmann (2002).

Um die virtuelle Umgebung für den Anwender zu visualisieren, gibt es verschiedene Arten von VR-Systemen. Eine Möglichkeit ist die Projektion der Umgebung auf große, feststehende Leinwände. Damit ein ganzer Raum dargestellt werden kann, werden bei einer sogenannten CAVE® (dt. Höhle) bis zu fünf Leinwände würfelförmig zusammengesetzt. Eine Variante der CAVE® ist die sogenannte Powerwall, hier wird nur auf einer Leinwand eine Stereoprojektion erzeugt. Eine Powerwall wird in erster Linie dann verwendet, wenn keine kompletten Innenräume sondern nur einzelne Objekte dargestellt werden sollen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von kopfgestützten Displays, allgemein als Head-Mounted Displays bezeichnet. Hier trägt der Anwender entsprechend kleine Displays vor dem Kopf, über die eine virtuelle Umgebung visualisiert wird.

1.2 Anwendungsfelder für Virtual Reality

Der Grund für den Einsatz von VR-Systemen in der Industrie ist in den meisten Fällen der gleiche. Durch die Visualisierung von zukünftigen Welten bzw. Objekten soll eine Bewertung derselben ermöglicht werden. Dabei bieten sich einige Vorteile. So können Umgebungen beispielsweise schon beurteilt werden, bevor sie real entstehen. Damit kann die Qualität des Ergebnisses verbessert werden, sodass später aufwendige Änderungen am realen Objekt entfallen. Insbesondere im Bereich

der Architektur, des Automobilbaus oder der Fabrikplanung bietet sich so ein immenser Vorteil, da Änderungen an realen Objekten sehr teuer bzw. nicht umsetzbar sind.

Bei einem Entwicklungsprozess, in dem zur Darstellung des Entwicklungsstandes Modelle oder Prototypen vorgesehen sind, lässt sich weiteres Einsparpotenzial erkennen. Dies ergibt sich, wenn reale Bauteile durch die Anwendung von virtuellen Methoden eingespart werden können. Indem die Bauteile vorher in der virtuellen Umgebung beurteilt werden, gibt es auch hier die Möglichkeit, die Qualität der Bauteile zu erhöhen. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist die kontinuierliche Begleitung des Entwicklungsprozesses, da im Gegensatz zu den realen Bauteilen keine Zeit für die Fertigung benötigt wird.

Innerhalb der Industrie sind die Anwendungsmöglichkeiten für VR-Systeme in zwei Hauptbereiche aufgeteilt. Einerseits gibt es die sogenannte visuelle und ästhetische Absicherung (vgl. auch Stäbler, 2007), bei der ein Objekt in einer virtuellen Umgebung beurteilt wird. Dabei kann es sich beispielsweise um Architektur oder Design handeln, aber auch um die Visualisierung von technischen Zusammenhängen und Komponenten. Hier kommt es in erster Linie darauf an, den Verlauf von Flächen sowie von Proportionen zu bewerteten. Die ästhetische Absicherung erfordert eine hohe Bildqualität. In einigen Bereichen wird für die ästhetische Absicherung eine Monodarstellung verwendet, um störende Effekte durch den künstlich erzeugten Stereoeindruck zu vermeiden. Diese Systeme sind dann allerdings streng genommen keine VR-Systeme mehr und sollen deshalb hier nicht näher betrachtet werden.

Andererseits gibt es den Bereich der funktionalen Absicherung, bei dem in der virtuellen Umgebung Fragestellungen interaktiv bewertet werden. Dazu gehören beispielsweise die Einbaumontagesimulation und die Abprüfung von ergonomischen Faktoren wie Erreichbarkeit und Zugänglichkeit. Dafür müssen entsprechende Interaktionsmittel wie Datenhandschuhe zur Verfügung stehen. Grundlage für eine hohe Ergebnisqualität ist die Genauigkeit der visualisierten Daten bezüglich Abmessungen und Position. Obwohl sich die Anforderungen an die visuelle und ästhetische Absicherung und an die funktionale Absicherung teilweise stark unterscheiden, müssen oftmals beide Anwendungsfelder von einem System abgedeckt werden.

In Abbildung 3 ist beispielhaft der Einsatzbereich von VR in einem Entwicklungsprozess dargestellt.

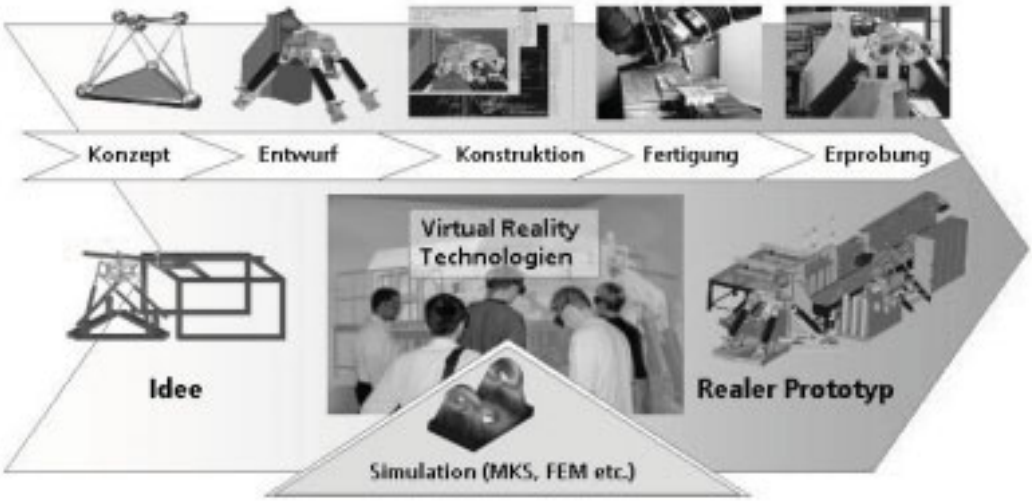


Abbildung 3: Virtual Reality im Entwicklungsprozess (Neugebauer, Weidlich, Kolbig & Polzin, 2004).

Neben der industriellen Anwendung werden VR-Systeme auch zunehmend in der Forschung eingesetzt. Dort wird, wie auch in dieser Arbeit, der Einfluss der virtuellen Umgebung auf die menschliche Wahrnehmung untersucht. Dabei liegt der Fokus in der Forschung in erster Linie auf der Validierung und Weiterentwicklung von VR-Systemen. Weiterhin bieten virtuelle Versuchsumgebungen eine unendliche Variantenvielfalt. So können Versuche einfacher und schneller durchgeführt werden. Da in virtuellen Umgebungen Situationen simuliert werden können, die in realer Umgebung kaum oder gar nicht zu erzeugen sind, werden im Bereich der kybernetischen und der psychologischen Forschung zunehmend auch virtuelle Versuchsumgebungen eingesetzt (vgl. auch Ernst, 2001; Riecke, von der Heyde & Bülthoff, 2001).

Betrachtet man die Entwicklung von VR-Systemen in den letzten Jahren, so stellt man fest, dass sich die Anwendungen und Einsatzszenarien kaum geändert haben. Obwohl sich die Computergrafik stark weiterentwickelt hat, ist die Bildqualität noch nicht annähernd auf einem realistischen Niveau. Das betrifft insbesondere die Darstellung von Oberflächen. Ebenso ist die Echtzeitfähigkeit der Systeme nicht immer gegeben. Hier stellt sich nun die Frage, wie stark sich diese Einschränkungen bei der Visualisierung der virtuellen Umgebungen auf die Ergebnisse innerhalb der industriellen Anwendungen auswirken. Denn die technische Machbarkeit an sich ist kein Garant für einen sinnvollen Einsatz im Sinne des Anwenders. Diese Frage lässt

sich aber auf Grund der Vielfalt der VR-Systeme sowie der unterschiedlichen Anwendungen nur schwer beantworten. Deshalb soll hier eine Abgrenzung erfolgen.

Es sollen nur VR-Systeme betrachtet werden, die den Definitionen in Kapitel 1.1 entsprechen. Weiterhin soll die Anwendung des Systems als produktives Werkzeug innerhalb eines Entwicklungsprozesses zu Grunde gelegt werden (vgl. Symietz, Ostermann & Zimmermann, 2001).

1.3 Stand der Forschung und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick über den Stand der Forschung auf dem Gebiet der Beurteilung von VR-Systemen gegeben. Anschließend erfolgt ein kurzer Einblick in die Physiologie der zielgerichteten Greifbewegung. Diese spielt im Hinblick auf die zunehmend wichtiger werdende Integration von haptischem Feedback in virtuelle Umgebungen eine besondere Rolle.

In der Vergangenheit hat es bereits viele Ansätze gegeben, VR-Systeme zu bewerten. Am häufigsten wurden dabei die beiden folgenden Bewertungsverfahren verwendet. Einmal erfolgte eine Bewertung des Systems anhand seiner technischen Spezifikationen. Im anderen Fall wurden zwei oder mehrere VR-Systeme miteinander verglichen und dann das für die vorausgesetzte Anwendung am besten passende ausgewählt. Diese Ansätze führen jedoch nur zu einem einzelnen oder einem vergleichenden Ergebnis und nicht zu einer allgemeingültigen Aussage. Durch den Vergleich von virtueller und realer Umgebung kann die Qualität des VR-Systems wesentlich exakter bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist für Simulationsanwendungen aller Art eigentlich üblich, kommt bei VR-Anwendung aber weniger vor, da der Focus meist mehr auf der technischen Machbarkeit als auf den Anforderungen für die Anwendung liegt.

Um die Qualität der virtuellen Umgebung zu bewerten, gibt es verschiedene Systemparameter wie Bildaufbaurate, Realitätsnähe usw. (vgl. Hofmann, 2002; Regenbrecht, 1999; Slater & Wilbur, 1997). Der Wert der Parameter hängt dabei von der jeweiligen Anwendung ab. Hinzu kommt, dass die virtuellen Umgebungen je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen erzeugt wurden (HMD, CAVE® etc.). Dabei sind nicht alle Parameter beliebig zwischen diesen Systemen vergleichbar. In Tabelle 1 wird ein Überblick über die Parameter gegeben.

Tabelle 1: Kategorisierung kontrollierbarer präsenzbeeinflussender Faktoren (angelehnt an Hofmann, 2002).

Kategorisierung kontrollierbarer präsenzbeeinflussender Faktoren			Erhöhung der Präsenz durch...
Gerätetechnische Faktoren		Visuelle Stimuli	Steigerung der Bildaufbaurate Stereoskopische Darstellung Anpassung der Kopfposition (head-tracking) Vergrößerung des Sichtwinkels Erhöhung der Bildauflösung
		Haptische Stimuli	Kraftrückkopplung Taktile Rückkopplung
Inhaltliche Faktoren	Aktives Handeln in der virtuellen Umgebung	Selbst-bewegung	Körperbewegung relativ zur virtuellen Umgebung
		Objekt-interaktion	Verfügbarkeit von Objektinteraktion Mühelosigkeit der Interaktion Vorhersagbarkeit der Reaktion der virtuellen Umgebung Aufmerksamkeitsbindung durch die Aufgabe
	Passives Beobachten der virtuellen Umgebung	Realitätsnähe der Darstellung	Allgemeine bildliche Realitätsnähe
Umfeld-Faktoren			Abschottung von Umweltgeräuschen

Weiterhin sollen neben der physiologischen Wahrnehmung auch individuelle und subjektive Parameter untersucht werden. Diese Parameter sind wesentlich vielfältiger und komplexer und somit schwerer wahrzunehmen als reine Wahrnehmungsschwellen.

Bevor die Vorgehensweise genauer erläutert wird, werden einige Arbeiten vorgestellt, die an die hier besprochenen Fragestellungen grenzen.

Hofmann (2002) untersuchte, ob Raumwahrnehmung und Präsenz zusammenhängen, bzw. inwieweit die Raumwahrnehmung durch die Präsenz beeinflusst wird. Um dies zu beantworten, wurden umfangreiche Versuche in einer CAVE durchgeführt. In diesen Versuchen weist Hofmann nach, dass Raumwahrnehmung und Präsenz korrelieren. Weiterhin werden Bildaufbaurate, Realitätsnähe und Leuchtdichte als beeinflussende Faktoren für die Größenwahrnehmung identifiziert. Die Arbeit von Hofmann bildet durch die Erläuterung der Beziehung zwischen Präsenz und Raumwahrnehmung eine Basis, auf deren Grundlage die virtuelle Umgebung bewertet werden kann. Die identifizierten Einflussfaktoren ermöglichen einen Rückschluss darauf, welche Systemkomponente welchen Einfluss auf die Wahrnehmung in der virtuellen Umgebung ausübt.

Die Arbeit von Ernst (2001) untersucht die visuomotorische Integration beim Menschen. Dafür wurde die visuelle und haptische Wahrnehmung von virtuellen und realen Objekten untersucht. Interessant ist hier eine Versuchsreihe zur visuellen und haptischen Größendiskriminierung, bei der verschiedene Größen von realen und virtuellen Würfeln miteinander verglichen wurden. Die durchschnittliche Wahrnehmungsschwelle gibt Ernst mit 6,3 mm bei einer Würfelgröße von 55 mm an. Weiterhin wird nachgewiesen, dass die Wahrnehmungsschwelle für die visuelle und haptische Größendiskriminierung trotz einer gewissen Adaption konstant ist und sich für Versuche zur menschlichen Wahrnehmung eignet.

Braun (1998) führte eine Validierungsstudie für einen „Variablen Ergonomie-Prüfstand“ durch, indem die subjektive Beurteilung des Prüfstandes mit der von Serienfahrzeugen verglichen wurde. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Bewertung im Prüfstand und im Serienfahrzeug ermittelt. Auch wenn Braun kein VR-System verwendete, weist er einen Weg auf, wie reale Fahrzeuge mit einem gewissen Abstraktionsgrad simuliert werden können. Weiterhin zeigt Braun mit der von ihm entwickelten Arbeitsmethodik, wie neue Simulations- und Bewertungswerkzeuge effizient eingesetzt werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bereits gute Ansätze für die Bewertung von virtuellen Umgebungen und VR-Systemen vorhanden sind. Darüber hinaus gibt es Methoden für die Beurteilung der menschlichen Wahrnehmung in virtuellen Umgebungen, auf denen in dieser Arbeit aufgebaut werden kann.

Da die Integration von haptischem Feedback in virtuellen Umgebungen eine zunehmend wichtige Rolle spielt, soll im Folgenden ein kurzer Überblick über die Anatomie der beteiligten Körperteile sowie den Ablauf der Greifbewegung gegeben werden. Ebenso wichtig ist in diesem Zusammenhang die Genauigkeit der Greifbewegung sowie der Tiefenwahrnehmung (Propriozeption).

Der menschliche Hand - Arm Apparat ist ein komplexes Gebilde aus Muskeln und Knochen und wird über ein ausgedehntes Nervensystem gesteuert. In Abbildung 4 sind die Knochenstruktur sowie die Muskulatur von Schulter, Ober- und Unterarm sowie der Hand abgebildet.

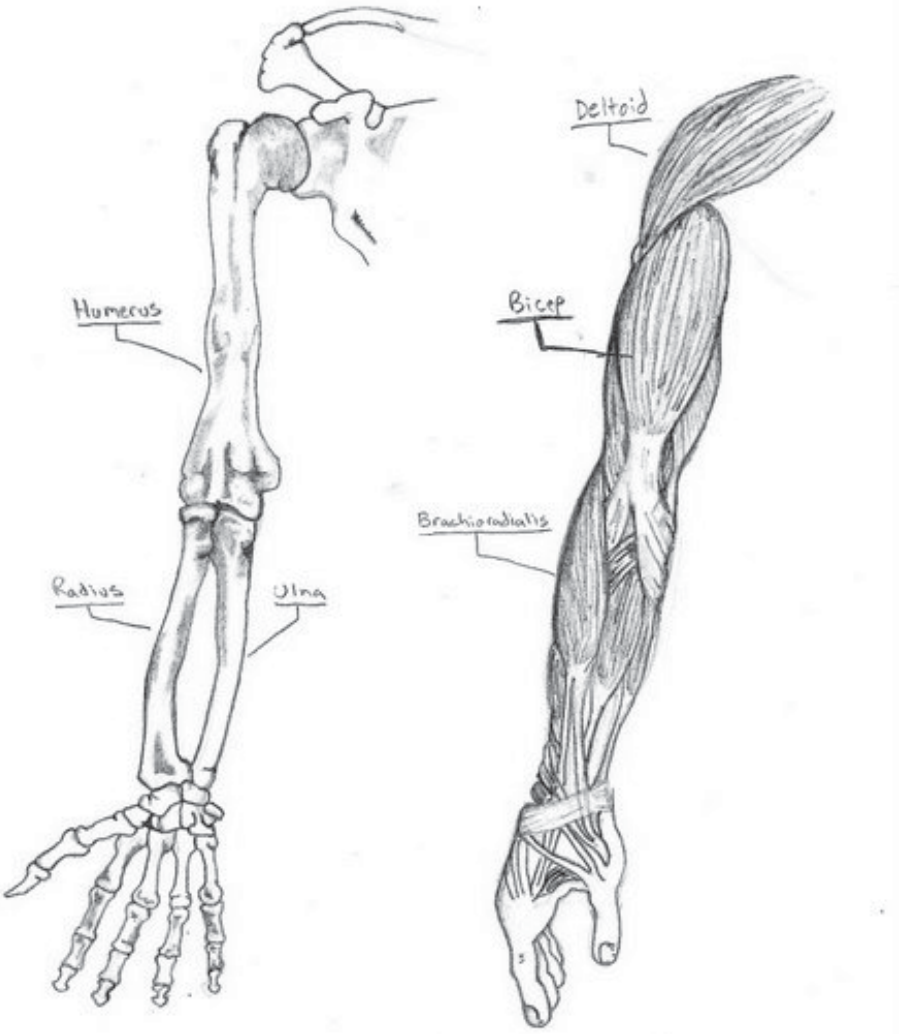


Abbildung 4: Knochen und Muskulatur des menschlichen Armes (Picasa, 2008).

Um die Position der Hand ohne visuelle Unterstützung zu bestimmen, verfügt der Arm über drei verschiedene Rezeptorenarten. Die Spindelrezeptoren in den Muskeln nehmen die Muskelstreckung auf, die Golgori-Sehnenorgane die Muskelspannung und somit auch einwirkende Kräfte. In den Gelenken wird die Position der einzelnen Knochen zueinander durch Gelenkrezeptoren registriert. Aus dieser Kombination der drei Reize kann so die Lage der Körperteile erkannt werden. Bei einer Greifbewegung werden das Ziel und die Hand meistens noch vom Auge erfasst. Kommt es dann zum Kontakt mit dem Greifobjekt wird dies über Druckrezeptoren in der Haut registriert. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Sinnesorganen und der daraus resultierende Regelkreis für die Position von Hand und Greifobjekt ist in Abbildung 5 dargestellt.

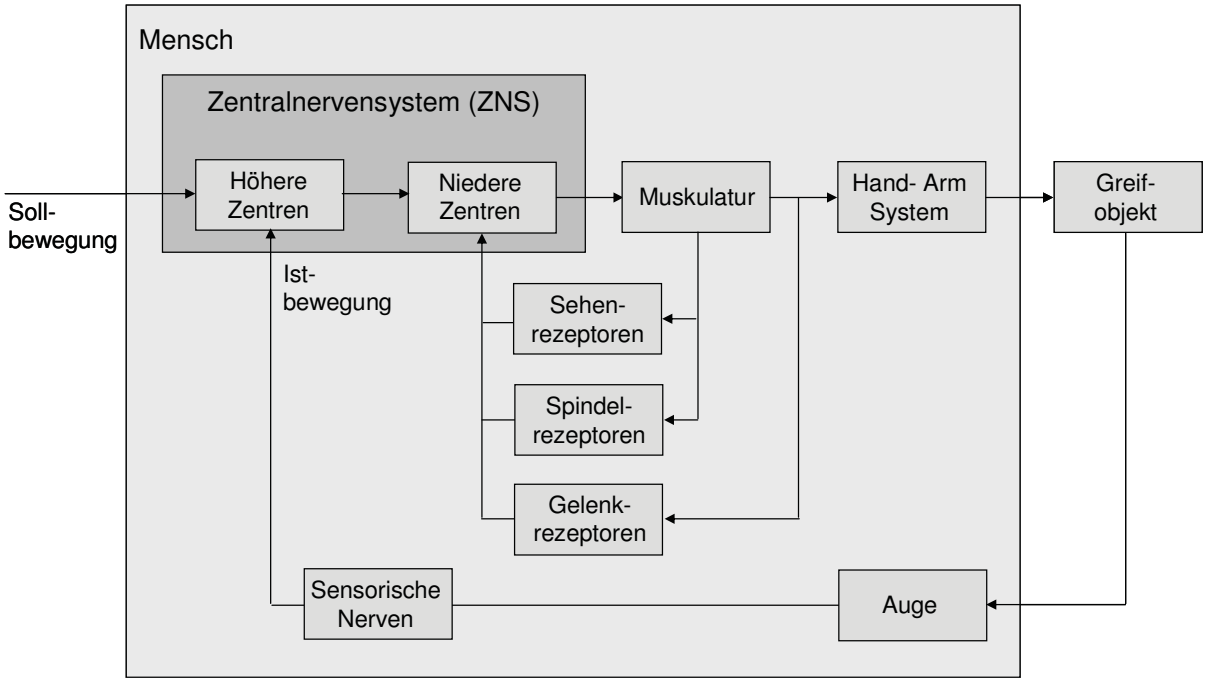


Abbildung 5:: Haptischer und visueller Regelkreis für die Positionswahrnehmung von Greifobjekten (adaptiert nach Göbel, 2000).

Bei wissenschaftlichen Untersuchungen der gezielten Greifbewegung wurden in erster Line zeitliche Kennwerte sowie die Bewegungsbahnen analysiert. Diese Informationen sind nicht nur informationspsychologisch interessant, sondern auch für die Gestaltung von industriellen Produkten und für militärische Anwendungen bedeutsam (vgl. auch HdE, 1989 und Alexander, 2002). Die räumliche Ungenauigkeit der gezielten Greifbewegung ist meistens von nachgelagerter Bedeutung, da die Bedienelemente im Regelfall ausreichend dimensioniert sind.

Die visuelle Komponente spielt bei der gezielten Greifbewegung eine wichtige Rolle. Proteau (1992) stellt dazu in seinen Versuchen fest, dass für eine hohe Genauigkeit eine visuelle Kontrolle unbedingt erforderlich ist, während bei einer ungenauen Zielvorgabe die Rückmeldung aus der Muskelsteuerung ausreicht. Da hier die visuelle Komponente durch ein VR-System simuliert wird, ist es notwendig zu betrachten, wie genau die Tiefensensibilität ohne visuelle Kontrolle funktioniert. Der ungünstigste Fall würde dann eintreten, wenn das VR-System keinerlei nutzbare visuelle Information simulieren könnte.

Blankenfeld (2002) untersuchte die gezielte Zeigebewegung mit dem Zeigefinger und ermittelte Abweichungen vom angegebenen Ziel. Die Versuchspersonen sollten mit dem Zeigefinger einen Kreis mit einem Durchmesser von 50 mm treffen. Dieses Ziel befand sich dabei 30 cm hinter und 10 cm oberhalb vom Startpunkt des Fingers. Die eigentliche Zielbewegung sollten die Versuchspersonen mit geschlossenen Augen durchführen. Es ergaben sich folgenden Ergebnisse, die Abweichung in der Tiefe betrug +/- 8 - 39 mm, in der Horizontalen von +/- 3 - 12 mm und in der Vertikalen +/- 3 - 14 mm.

Eine Untersuchung mit der visuellen Komponente ist im Handbuch der Ergonomie (HdE, 1989) zu finden. Bei diesem, aus der Arbeitsplatzgestaltung abgeleiteten, Versuch wurde die horizontale Abweichung zu einem Zielpunkt bestimmt. Als Variablen wurden dabei Tisch- und Zielhöhe sowie die Bewegungsweite verwendet. Die mittlere Abweichung von Zielpunkt liegt für die Altersgruppe von 20 – 50 Jahren zwischen 0,43 mm und 1,6 mm.

Diese Ergebnisse lassen sich aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbau sowie der unterschiedlichen Fragestellungen kaum untereinander vergleichen. Eines kann aber gesagt werden, für eine genaue zielgerichtete Bewegung ist die visuelle Komponente von entscheidender Bedeutung. Deshalb können die Ergebnisse von Blankenfeld (2002) und HdE (1989) dazu verwendet werden, einen Rückschluss auf die Qualität der verwendeten virtuellen Umgebung zu ziehen.

1.4 Vorgehensweise und Methodik

Wie im vorigen Kapitel erläutert, ist die Verwendung von zwei verschiedene Untersuchungsmethoden sinnvoll. Einerseits ein Vergleich der Wahrnehmung in virtueller und realer Umgebung. Anderseits der Vergleich der Bewertung von Fahrzeugmodellen in virtueller und realer Umgebung.

An die Methodik stellen sich dabei folgende Anforderungen:

- Die Vergleichbarkeit in realer und in virtueller Umgebung muss gewährleistet sein.
- Eignung für umfangreiche Untersuchungen mit größeren Versuchspersonen-kollektiven.
- Bezug zum alltäglichen Einsatz in der Virtuellen Sitzkiste und anderen VR-Anwendungen.
- Die Aufgabenstellung muss mindestens eine visuelle und eine haptische Komponente aufweisen.
- Aus den Ergebnissen sollen sich Richtwerte für die Gestaltung von VR-Umgebungen ableiten lassen.

Um die Wahrnehmung objektiv beurteilen zu können, bietet sich die Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen an. Diese sind genauer und reproduzierbarer als beispielsweise eine Befragung anhand von Fragebögen. Eine Wahrnehmungs-schwelle, die alle obigen Anforderungen erfüllt, ist die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung. Diese Divergenz tritt auf, wenn ein als haptisches Feedback integriertes reales Objekt nicht korrekt auf die Darstellung des virtuellen Objektes einkalibriert ist. Wenn beispielsweise das virtuelle Lenkrad gegenüber dem realen verschoben ist, liegt eine Divergenz zwischen dem realen und virtuellen Objekt vor. Da der Anwender das Lenkrad nur fühlt, also haptisch wahrnimmt und das virtuelle Lenkrad nur sieht, also visuell wahrnimmt, kommt es zu einer Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung (vgl. auch Voß & Bubb, 2007).

Damit die Divergenz vom Anwender überhaupt erkannt werden kann, muss das System einige Voraussetzungen erfüllen. Die Visualisierungsqualität muss so hoch sein, dass sich der Anwender ein genaues Bild über die Position eines dargestellten Objektes machen kann. Gerade die Tiefenwahrnehmung von Objekten in virtueller

Realität ist nicht problemlos (vgl. auch Willemsen, Gooch, Thompson & Creem-Regehr, 2005; Engstler, 2005).

Weiterhin werden durch diese Divergenz alle von Hofmann (2002) als relevant identifizierten Punkte für die Beurteilung der Qualität einer virtuellen Umgebung abgedeckt (vgl. Tabelle 1). Die Wahrnehmbarkeit dieser Divergenz stellt also nicht nur ein Qualitätsmerkmal für die Einkalibrierung von realen Bauteilen dar, sondern auch für die gesamte virtuelle Umgebung.

Prinzipiell gibt es natürlich viele verschiedene Formen dieser Divergenz. Hier müssen aber die Anforderungen an die Versuchsbedingungen erfüllt werden und es sollte ein Bezug zu den alltäglichen Anwendungen in virtuellen Umgebungen bestehen.

Als Basis wurden zwei Varianten ausgewählt. Einerseits die translatorische Divergenz, also die Verschiebung von realem Objekt gegenüber dem virtuellen in einer Ebene. Andererseits die rotatorische Divergenz, das heißt die Verdrehung beider Objekte gegeneinander. Beide Divergenzarten können auftreten, wenn das reale haptische Feedback nicht exakt auf das Objekt in virtueller Umgebung einkalibriert ist. Neben der Divergenzart ist auch die Richtung von Bedeutung, in der die Divergenz erzeugt wird. Um einen eventuellen Einfluss der virtuellen Umgebung auf die Richtung erkennen zu können, wurden die vier Divergenzrichtungen links, rechts, vorne und hinten definiert. Diese vier eindeutig zuortbaren Richtungen haben darüber hinaus den Vorteil, für die Versuchspersonen klar trennbar zu sein. In Abbildung 6 sind die Entstehung der Divergenz, sowie die Divergenzarten und -richtungen dargestellt.

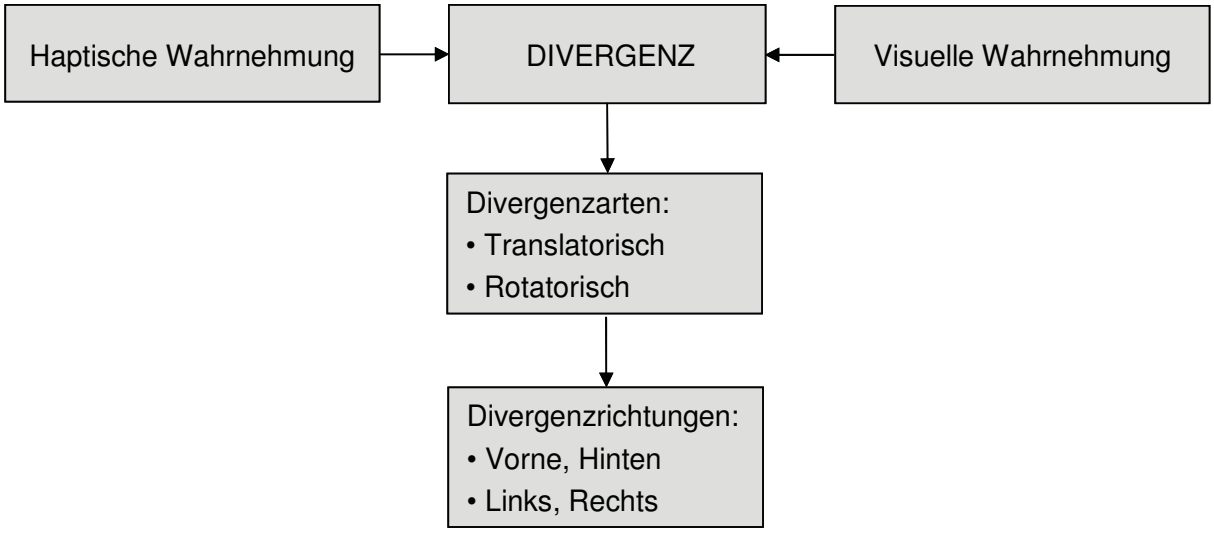


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Divergenz, sowie Divergenzarten und -richtungen.

Nachdem die Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung als ein geeignetes Versuchskriterium identifiziert wurde, muss nun ein passendes Greifobjekt definiert werden. Dieses soll für alle Versuchspersonen gut zu greifen sein und nur eine Greifart zulassen. Damit wird das Auftreten einer weiteren Variable vermieden. Ein einfaches Objekt, das alle Anforderungen erfüllt, ist ein Zylinder. Da ein Greifen von oben aufgrund des dort befestigten Trackingtargets nicht möglich ist, bleibt nur der Umfassungsgriff. In Verbindung mit einem Hinweis vor der Versuchsdurchführung kann so sichergestellt werden, dass immer die gleiche Greifart verwendet wird.

Der Durchmesser des Zylinders muss so gewählt werden, dass ein Greifen mit einer kleinen Hand problemlos möglich ist, ebenso dürfen sich bei einer großen Hand die Fingerspitzen nicht berühren. Die Abmaße des Zylinders wurden in Vorversuchen bestimmt (s. Kapitel 2.1.1.2).

Weiterhin bildet die Zylinderform eine Brücke zu alltäglichen Anwendungen in der Virtuellen Sitzkiste. So kann eine Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung beispielsweise bei der ungenauen Einkalibrierung von Lenkrad, Schalthebel oder einem Türzuziehgriff vorkommen.

Um Einflüsse der virtuellen Umgebung auf das Versuchsergebnis zu erkennen, müssen VR-spezifische Faktoren wie Cybersickness und Präsenzempfinden der Versuchspersonen berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Belastung der

Versuchspersonen durch den Versuch. Zusätzlich wurden versuchspersonen-spezifischen Parameter wie Größe, Alter usw. abgefragt.

Als zweiter Untersuchungsblock wird die Bewertung eines Fahrzeugmodells in realer und in virtueller Umgebung verglichen. Hier soll geprüft werden, ob auch subjektive, individuelle Fragestellungen in virtueller Umgebung untersucht werden können. Weiterhin können so auch die Interaktionsmöglichkeiten des Anwenders mit dem System bewertet werden, da der Anwender zur Beurteilung der Fragestellungen mit der virtuellen Umgebung interagieren muss (vgl. auch Broll, 1998).

Damit ein Bezug zu alltäglichen Anwendungen in der Virtuellen Sitzkiste besteht, wurde hier ein aktuelles Fahrzeugmodell ausgewählt und in beiden Umgebungen bewertet. Analog zu den ermittelten Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung erfolgte dann der Vergleich der Ergebnisse aus beiden Umgebungen.

Ein Überblick über den Aufbau der experimentellen Untersuchungen ist in Abbildung 7 dargestellt.

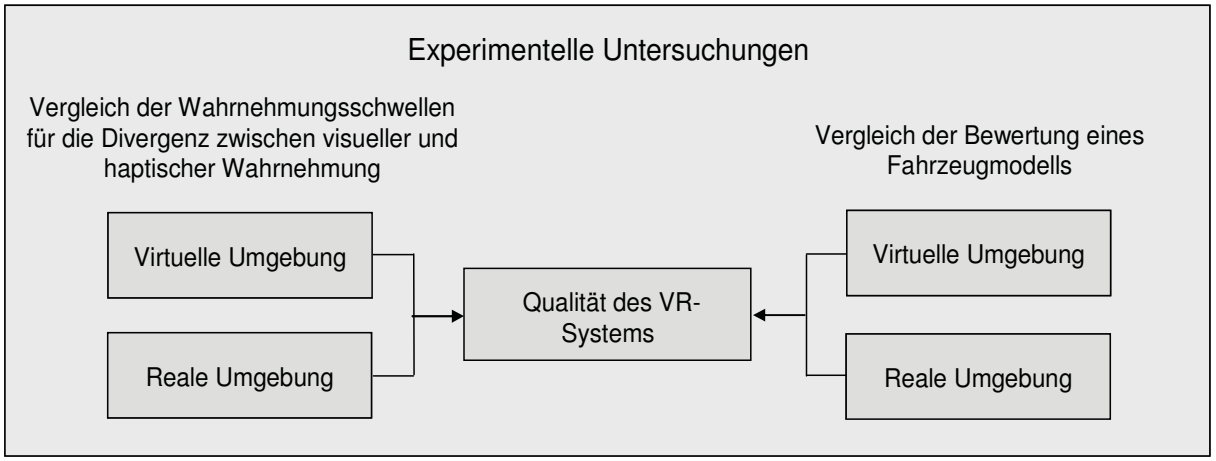


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen den experimentellen Untersuchungen.

Basierend auf dem zweifachen Vergleich der Wahrnehmung in realer und in virtueller Umgebung kann nun die Qualität des VR-Systems bewertet werden. Anschließend lassen sich Maßnahmen zur Weiterentwicklung der virtuellen Umgebung ableiten.

Bei der Umsetzung dieser Weiterentwicklung müssen allerdings verschiedene Punkte berücksichtigt werden:

- Bezug zu Anwendungsszenarien in der Virtuellen Sitzkiste.
- Konformität zu den ergonomischen Anforderungen.
- Möglichkeiten zur technischen Umsetzung.

Aus den in diesem Kapitel definierten Anforderungen an die experimentellen Untersuchungen ergibt sich der Aufbau der Arbeit.

1.5 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit soll die Frage beantwortet werden, wie hoch die Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in einer virtuellen Umgebung ist. Dazu wurden verschiedene Experimente in virtueller und realer Umgebung durchgeführt. Auf der Basis der Ergebnisse kann ein Vergleich zeigen, inwieweit die menschliche Wahrnehmung bzw. die Beurteilung von ergonomischen Fragestellungen in beiden Umgebungen gleich ist. Daraufhin soll eine Bewertung der virtuellen Umgebung erfolgen, an die sich die Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen anschließt. In Abbildung 8 ist der Aufbau der Arbeit dargestellt.

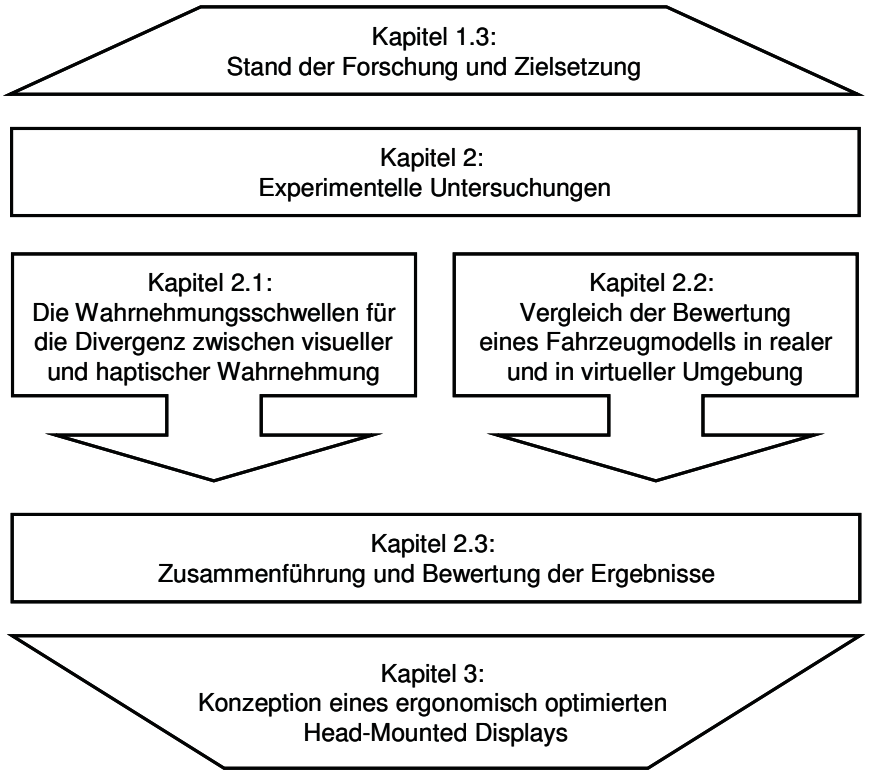


Abbildung 8: Aufbau der Arbeit.

Hier kann schon gesagt werden, dass sich in den experimentellen Untersuchungen das verwendete Head-Mounted Display als der Hauptschwachpunkt des verwendeten VR-Systems herausgestellt hat. Um eine Lösung für dieses Problem anzubieten, wird in Kapitel 3 ein ergonomisch optimales HMD konzipiert.

2 Experimentelle Untersuchungen

In Kapitel 1 wurde ausführlich auf die relevanten Fragestellungen eingegangen und welche Versuche zu deren Beantwortung beitragen können. Diese Versuche werden nun im Einzelnen erläutert, neben Aufbau und Durchführung gilt dies insbesondere für die Ergebnisse. Begonnen wird mit der Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung. Nach dem Zusammenführen und Interpretieren der Ergebnisse wird die Bewertung eines Fahrzeugmodells in realer und in virtueller Umgebung verglichen. Ziel dieser Versuche ist es, aus den Ergebnissen Rückschlüsse über die Qualität der verwendeten virtuellen Umgebung zu erhalten.

2.1 Die Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung

In den nächsten Kapiteln wird die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung erklärt. Hier wird besonders das verwendete Virtual-Reality System näher beschrieben. Anschließend folgen die Durchführung der Versuche und die Ergebnisse. Begonnen wird mit den Versuchen in virtueller Umgebung, anschließend folgen die Versuche in realer Umgebung.

2.1.1 Versuche in virtueller Umgebung

2.1.1.1 Versuchsaufbau – Virtuelle Sitzkiste

Die Versuche in virtueller Umgebung wurden mit der Virtuellen Sitzkiste der AUDI AG durchgeführt. Grundsätzlich besteht das System (Abbildung 9) aus den fünf Hauptgruppen: Trackingsystem, Datenhandschuh, virtuelles Menschmodell RAMSIS-VR, Grafikberechnung sowie dem HMD. Die Systemkomponenten an sich entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Dies betrifft neben der Software insbesondere Rechner, Grafikkarten und HMD.

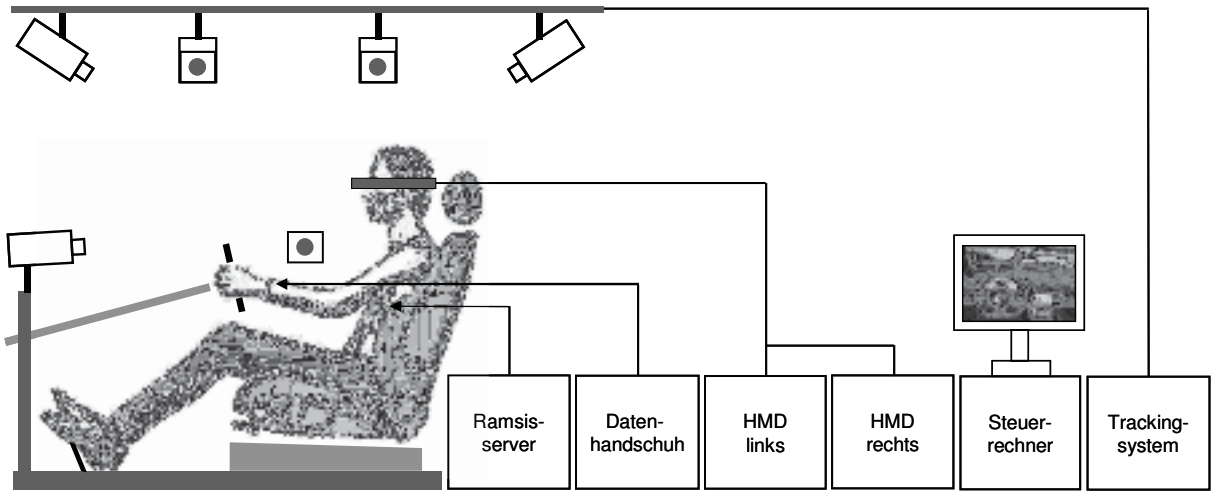


Abbildung 9: Überblick über die Systemkomponenten der Virtuellen Sitzkiste.

Die Sitzkiste, in der die Versuchspersonen Platz nehmen, bildet einen Fahrerarbeitsplatz nach. Dieser ist hinsichtlich Lenkrad, Sitz und Pedalerie so variabel, dass sich vom Sportwagen bis zum SUV alle Fahrzeugklassen abbilden lassen.

2.1.1.1.1 Trackingsystem

Ein Trackingsystem erfüllt innerhalb des VR-Systems zwei wichtige Aufgaben. Einerseits wird über das Tracking des Kopfes der Grafikberechnung mitgeteilt, in welche Richtung der Anwender sieht, so kann das entsprechende Bild berechnet werden. Andererseits wird es durch das Tracking möglich, die Bewegung von realen Objekten in die virtuelle Umgebung zu übertragen. Beispielsweise kann die Bewegung des realen Lenkrades getrackt und dann in der virtuellen Umgebung visualisiert werden.

Das hier verwendete Trackingsystem der Firma A.R.T. gehört zu der Gruppe der aktiven optischen Systeme und arbeitet mit Infrarot. Es besteht im Wesentlichen aus sechs Kameras, einem Steuerrechner und der dazugehörigen Software DTrack (hier Version 1.23.6). Vier der Kameras sind über der Sitzkiste positioniert. Zwei weitere Kameras sind in Höhe des Lenkrades auf der rechten Seite bzw. schräg vorne angebracht, um Trackingbereich und Genauigkeit des Tracking der rechten Hand zu verbessern (vgl. Abbildung 9).

Die zu trackenden Objekte sind mit sogenannten Markern versehen. Ein Marker besteht aus je vier Kugeln, die mit einer infrarotreflektierenden Beschichtung versehen sind. Um die Entfernung zwischen Markern und Kamera zu bestimmen,

senden die Kameras synchronisierte Infrarotblitze aus, die von den Kugeln reflektiert werden. Nach der Reflektion des Blitzes ergibt sich aus der Laufzeit des Signals die Entfernung. Auf diese Weise kann das System Position und Orientierung von jedem Objekt ermitteln, das mit einem Marker versehen ist. Im Regelfall sind dies HMD, Hände und Lenkrad, hinzu kommen je nach Anwendung noch Bedienelemente oder Versuchsobjekte.

Laut Schrader (2003) ist das Tracking-System speziell für VR-Anwendungen konstruiert und ausreichend genau. Die mittlere Abweichung liegt laut A.R.T. (2007) bei 0,43 mm, die maximale bei 1,7 mm.

Einziger Nachteil des Systems ist der zwingend erforderliche direkte Sichtkontakt zwischen Markern und Kameras. Reißt dieser mehrmals kurzzeitig ab, beginnt die virtuelle Geometrie zu „ruckeln“. Wenn der Kontakt vollständig abreißt, verharrt die virtuelle Geometrie an der letzten bekannten Position. Für die hier durchgeführten Versuche wurde die Anordnung der Kameras entsprechend optimiert, sodass dieser Fall nicht auftrat.

2.1.1.1.2 Datenhandschuhe

Die hier verwendeten Datenhandschuhe der Firma A.R.T. arbeiten wie das Trackingsystem auf Infrarotbasis, allerdings werden hier LEDs als aktive Marker verwendet. Jeweils eine LED ist mit einer kleinen Klammer an der jeweiligen Fingerkuppe befestigt. Die Position wird wie bei herkömmlichen Markern über die Laufzeit des Infrarotblitzes bestimmt, anschließend wird basierend auf einer kinematischen Kette die Fingerhaltung berechnet. Zur Positionsbestimmung der Hand wird ebenfalls ein aktiver Marker verwendet, der auf dem Handrücken angebracht ist. In Abbildung 10 ist der Datenhandschuh für die rechte Hand abgebildet. Wie deutlich erkennbar ist, verfügt das aktuelle Modell nur über drei getrackte Finger.

Abbildung 10: Datenhandschuh der Firma A.R.T. mit drei getrackten Fingern (A.R.T., 2007a).

Um verschiedene Fingergrößen abdecken zu können, gibt es die Fingerklammern in zwei verschiedenen Größen. Da die Hände jedes Menschen unterschiedlich groß bzw. unterschiedlich proportioniert sind, ist eine einmalige Kalibrierung erforderlich. Dabei ermittelt das System die Länge der Finger sowie der einzelnen Glieder. Damit keine störenden Kabel verlegt werden müssen, ist der Handschuh an sich kabellos, die Energieversorgung erfolgt über einen Akku.

Abgesehen von den etwas umständlichen Fingerklammern und der Tatsache, dass nur drei Finger getrackt werden, weist der Datenhandschuh keine offensichtlichen Schwachpunkte auf.

2.1.1.1.3 Virtuelles Menschmodell RAMSIS-VR

Durch das Tragen eines HMDs sieht der Anwender nur die virtuelle Umgebung und ist visuell völlig von der realen Welt abgekoppelt. Damit der Anwender in der virtuellen Umgebung ein grafisches Abbild seines Körpers sieht, wird hier das virtuelle Menschmodell RAMSIS-VR der Firma HumanSolutions verwendet.

Das RAMSIS-VR Modell ist getrackt, vollbeweglich und anthropometrisch konfigurierbar. Entsprechend der zu visualisierenden Person können die Parameter Größe, Korpulenz und das Verhältnis von Torso- zu Beinlänge eingestellt werden. Daraus wird dann auf Basis des Anthropologischen Atlas (Flügel, Geil & Sommer, 1986), einer wissenschaftlichen Datenerhebung von realen Personen, das Modell des Anwenders erstellt. Mit diesen anthropometrischen Daten wird über inverse Kinematik die Position der ungetrackten Körperteile wie z.B. der Ellenbogen berechnet.

Die Positionierung des Modells im Fahrzeug in der virtuellen Umgebung erfolgt an Füßen und Becken, die beiden Hände und der Kopf sind über Marker getrackt. In Verbindung mit dem A.R.T.- Fingertracking ist der RAMSIS-VR in der Lage, Haltung und Bewegung von Daumen, Zeige- und Mittelfinger nachzubilden. In Abbildung 11 ist ein virtuelles Fahrzeugmodell zu sehen, indem der RAMSIS-VR positioniert ist.

Abbildung 11: RAMSIS-VR in einem virtuellen Fahrzeugmodell.

Der einzige Schwachpunkt des RAMSIS-VR ist die Positionierung von nicht getrackten Körperteilen wie Ellenbogen oder Knien. Um diese exakt zu visualisieren, müsste die Datengrundlage für die Berechnung verbessert werden. Das könnte durch eine Erweiterung des Tracking geschehen oder durch eine genauere Vermessung der Versuchspersonen.

2.1.1.1.4 Grafikberechnung

Für die Grafikberechnung wird ein Clustersystem, bestehend aus einem Master-rechner und drei Clientrechnern verwendet. Ein Clientrechner versorgt den Beamer für die Leinwand, die beiden anderen jeweils ein Auge des HMD.

Betrieben wird dieser Cluster mit der Software Virtual Design 2 (VD2) der Firma vrcom. VD2 ist eines der wenigen Softwareprodukte am Markt, das neben der echtzeitfähigen Grafikberechnung auch die Anbindung von Datenhandschuhen und Menschmodellen unterstützt. In Abbildung 12 sind die Zusammenhänge zwischen der Grafikberechnung und den anderen Systemkomponenten dargestellt.

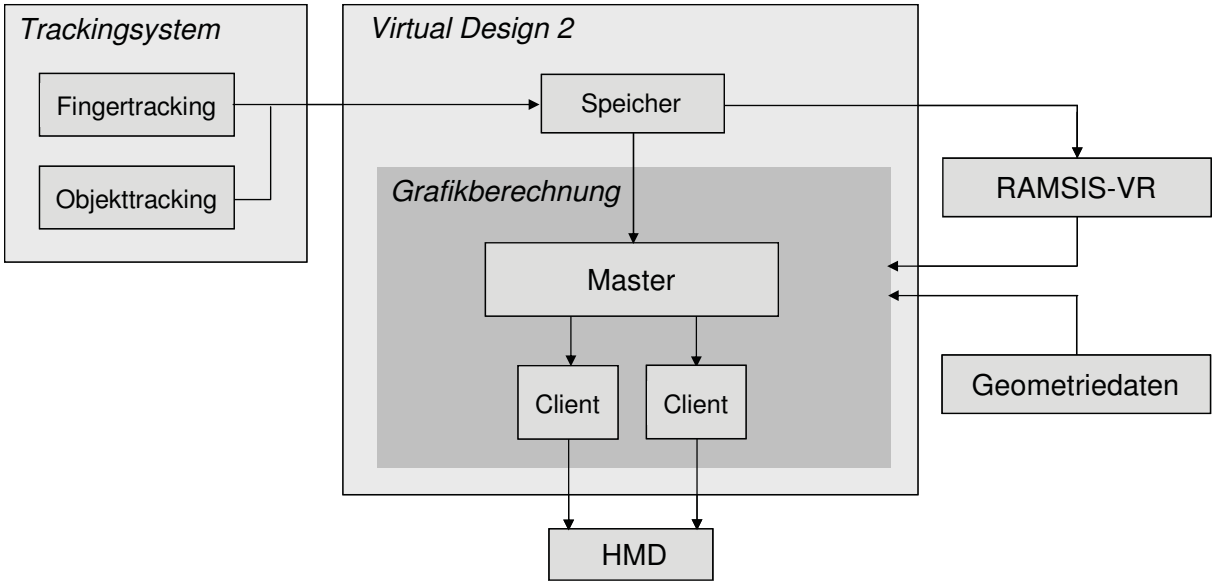


Abbildung 12: Datenfluss zwischen den Systemkomponenten.

Ausgewählt wurde die Software VD2 wegen ihrer vielfältigen Anwendungsfelder, die von Einbaumontagesimulation über virtuelle Kabel- und Schlauchverlegung bis zur Ergonomieanalyse reichen. Außerdem ist VD2 eines der weitverbreitetsten Softwareprodukte für funktionale Echtzeitanwendungen, es wird bei mehreren OEMs im Automobilbau, der Luftfahrt sowie an Hochschulen eingesetzt. Somit lassen sich die hier ermittelten Ergebnisse auch auf diese Anwendungen übertragen.

2.1.1.1.5 Head Mounted Display

Für die hier durchgeführten Versuche wurde das HMD SEOS120/40 der Firma SEOS verwendet (Abbildung 13). Es bietet ein horizontales Field-of-View von 120° bei 40° Stereo-Überlappung und ein vertikales Field-of-View von 67°. Die Auflösung beträgt 1280 x 1024 Pixel (horizontal x vertikal) bei einer Bildwiederholfrequenz von 60 Hz. Damit besitzt dieses SEOS HMD eine der besten Bilderzeugungen, die momentan am Markt erhältlich ist.

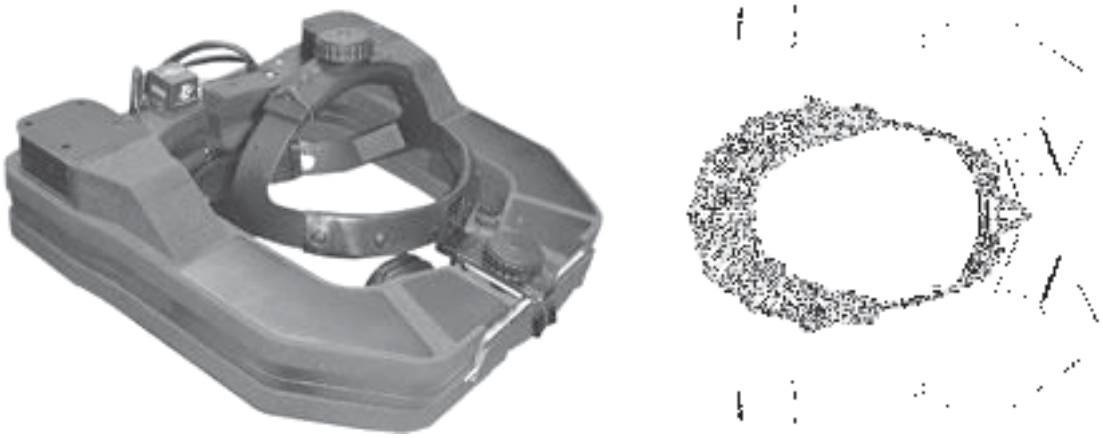


Abbildung 13: SEOS HMD 120/40 (links Außenansicht, rechts schematische Darstellung der Optik (adaptiert nach Haves & Blackkam, 2004)).

Das Field-of-view ist wesentlich kleiner als das menschliche Blick-Gesichtsfeld für Hellreize von 220° x 110° (horizontal x vertikal) (vgl. Kapitel 3.1.2). Diese Einschränkung führt dazu, dass der Anwender beim Umsehen seinen Kopf mehr bewegen muss, da sein Gesichtsfeld reduziert ist.

Da Brillenträger ihre Brille abnehmen müssen, um das HMD aufzusetzen, kann die Bildschärfe für jedes Auge individuell angepasst werden. Allerdings ist es aufgrund der geringen Tiefenschärfe für viele Anwender schwer, das Bild ausreichend scharf einzustellen. Weiterhin verschlechtert sich die Bildschärfe schon bei einem geringen Verrutschen des HMD.

Ebenfalls negativ auf die Bildqualität wirken sich die einbauten Displays aus. In Verbindung mit dem Field-of-View wird eine horizontale Auflösung von 3,9 Bogenminuten pro Pixel erzeugt. Da das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges eine Bogenminute (HdE, 1998) beträgt, sieht der Anwender die Übergänge zwischen den einzelnen Pixeln. Um dies zu verhindern, müsste die Auflösung mindestens ein Pixel pro Bogenminute betragen.

Ein weiteres Problem des HMD ist ein schwarzer Balken in der Mitte zwischen den beiden Augen. Dieser entsteht, wenn der Anwender an die Innenseite des Okulars (vgl. Abbildung 13) sieht. Dies stört die Überlappung der jeweiligen Bilder für die beiden Augen und wirkt sich so negativ auf den Stereoeindruck aus. Um das zu vermeiden, lässt sich der Augenabstand zwar einstellen, allerdings ist der Einstellbereich nach unten nicht ausreichend dimensioniert. So ist der minimal einstellbare Augenabstand für viele Anwender immer noch zu groß.

Das hohe Gewicht des verwendeten HMDs von einem Kilogramm (Haves & Blackham, 2004) und die daraus entstehende Trägheit führen bei vielen Anwendern nach einiger Zeit zur Ermüdung der Halsmuskulatur.

Für Versuche in der Virtuellen Sitzkiste ist die Kommunikation zwischen Versuchsleitung und Versuchsperson unerlässlich, deshalb fallen an diesem HMD zwei weitere Punkte negativ auf. Einerseits werden die Ohren teilweise durch die seitlichen Lichtkanäle verdeckt, andererseits erzeugt das HMD durch die lauten Lüfter selbst Störgeräusche.

Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass der größte Schwachpunkt des Systems das HMD ist, insbesondere folgende Punkt sind hier zu nennen:

- Das Field-of-View ist wesentlich kleiner als das menschliche Blick-Gesichtsfeld.
- Die Auflösung ist geringer als das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges.
- Das hohe Gewicht beeinträchtigt die Handhabbarkeit und führt zu Ermüdungserscheinungen beim Anwender.

Dieses HMD war allerdings zu dem Zeitpunkt der Anschaffung eines der besten auf dem Markt, und auch zum Zeitpunkt der Versuche war kein besseres Gerät verfügbar. Ein Konzept, wie ein ergonomisch optimales HMD gestaltet sein könnte, wird in Kapitel 3 erarbeitet.

2.1.1.1.6 Latenzzeit

Die zeitliche Differenz von der Bewegung eines getrackten Objektes (z.B. dem Kopf) bis zur Ausgabe des neu berechneten Bildes an den Anwender wird als Latenzzeit bezeichnet. Diese Latenzzeit ist nach Hofmann (2002) von entscheidender Bedeutung für die Qualität des VR-Systems. Neben einem negativen Einfluss auf die Größenwahrnehmung kann eine hohe Latenzzeit auch zu Cybersickness (Näheres in Costello, 1997) und damit zu Schwindelgefühlen und Unwohlsein führen.

Die Gesamtlatenzzeit setzt sich dabei aus den Zeiten der einzelnen Systemkomponenten zusammen. Während die Latenzzeiten des Trackingsystems mit 20 ms (A.R.T., 2007) und des HMDs mit 16,6 ms (Haves & Blackham, 2004) konstant sind,

schwankt die Latenzzeit der Grafikberechnung stark. Der Hauptfaktor dafür wiederum ist die Menge bzw. Detailgenauigkeit der visualisierten Daten.

Um die laut Schiedermeier (2004) als ausreichend anerkannten 15 Bilder pro Sekunde (66,6 ms für ein Bild) zu erreichen, bleiben für die Grafikberechnung nach Abzug der Zeiten für Trackingsystem und HMD noch 30 ms. Bei normalen Geometriemengen ist dies durchaus ausreichend, wenn aber komplette Fahrzeuge visualisiert werden sollen, wird hier dieser Wert überschritten. Um für die Versuche eine optimale Umgebung zur Verfügung zu stellen, wurde die verwendete Geometriemenge so dimensioniert, dass die 15 Bilder pro Sekunde immer gewährleistet waren.

Genaueres zur Leistungsfähigkeit von Software und System ist bei Stäbler (2007) zu finden.

2.1.1.2 Versuchsdesign und -durchführung

Die grundsätzliche Frage, welche Versuche zur Lösung der Fragestellungen beitragen können, wurde bereits in Kapitel 1 erläutert. Hier soll ein kurzer Überblick über das Versuchsdesign gegeben werden. Dieses muss nicht nur die Grundanforderungen wie Validität, Reliabilität und Objektivität erfüllen, es werden auch besondere Rahmenbedingungen durch das VR-System vorgegeben, die für die Versuchsdurchführung berücksichtigt werden müssen.

Um sicherzustellen, dass die ermittelten Wahrnehmungsschwellen auch reliabel sind, werden zwei Verfahren zu deren Ermittlung verwendet. Einerseits das klassische Herstellungsverfahren, bei dem der Reiz bis zur Wahrnehmungsschwelle gesteigert wird. Anderseits das Konstanzverfahren, dort werden Werte unter und über der Wahrnehmungsschwelle abgeprüft. Als Erstes wird mit dem Herstellungsverfahren die Wahrnehmungsschwelle ermittelt, danach mit dem Konstanzverfahren. Ob die Ergebnisse übereinstimmen, wird dann mit einem t-Test geprüft (vgl. auch Voß, Mergl & Bubb, 2007).

Schon im Vorfeld der Versuche hatte es sich bei Arbeiten mit dem VR-System gezeigt, dass 20 Minuten in der Immersion (näheres dazu in Slater & Wilbur, 1997) nicht überschritten werden sollten, um ein Auftreten von Cybersickness zu vermeiden. Zwar lässt sich diese Zeit durch eine Pause verlängern, aber 30 Minuten

sind als Obergrenze anzusehen (vgl. auch Symietz, Ostermann & Zimmermann, 2001). Deshalb ist es nicht möglich, eine Versuchsperson in alle vier Divergenzrichtungen mit beiden Verfahren zu testen (vgl. Kapitel 1.4). Um dennoch ein zusammenführbares Ergebnis zu erzielen, werden die Versuchspersonen analog zu den Divergenzrichtungen in zwei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe wird nur in die Richtungen vorne und hinten getestet, die zweite nur in die Richtungen links und rechts. In Abbildung 14 sind die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Versuchsumgebungen, den Divergenzarten und den Divergenzrichtungen dargestellt.

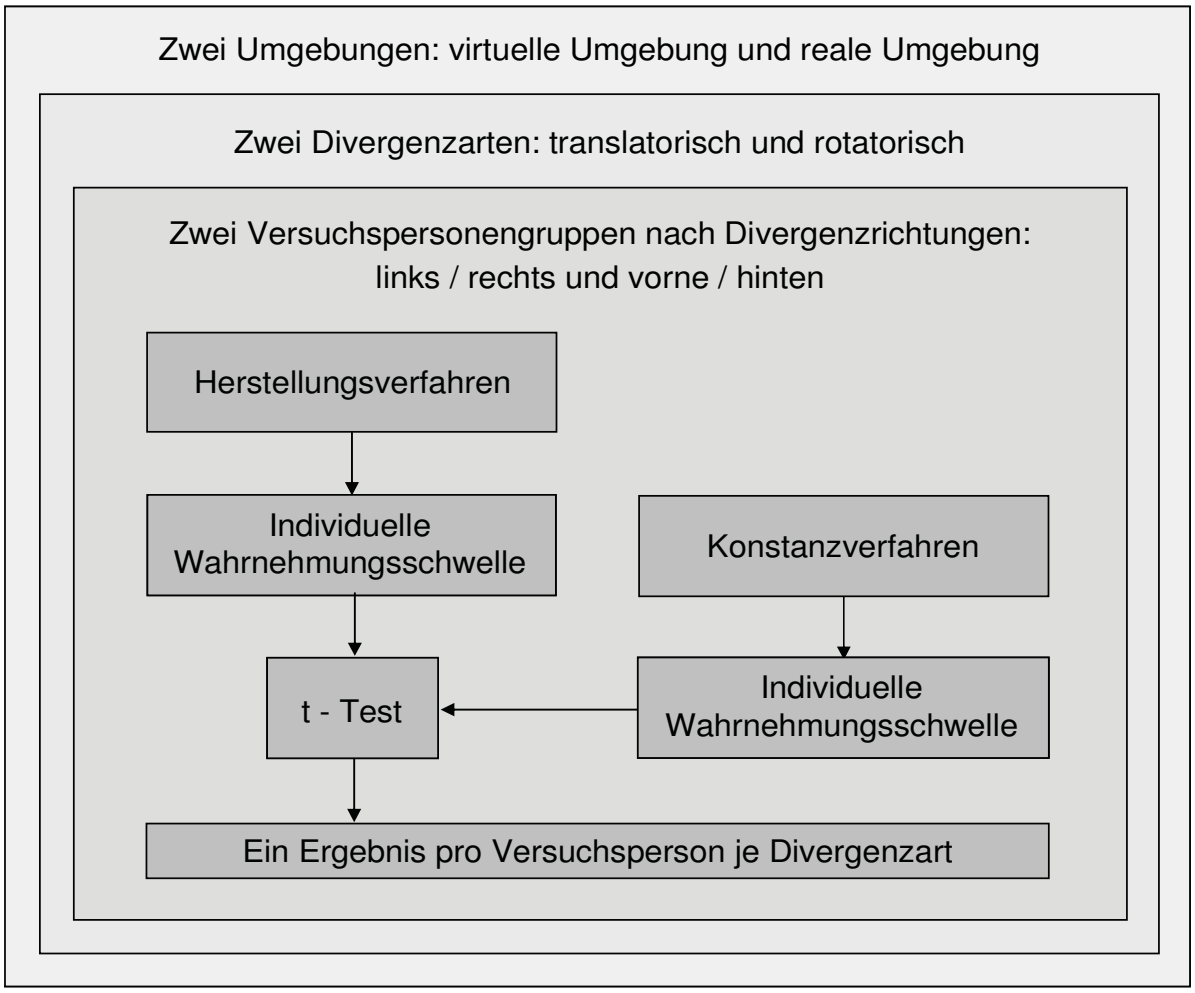


Abbildung 14: Darstellung des Versuchskonzeptes.

Zusätzlich zu den Wahrnehmungsschwellen werden weitere personenspezifische Parameter erhoben (s. Anhang A). In erster Linie sind es persönliche Daten, die sich später evtl. mit dem Versuchsergebnis in Verbindung bringen lassen können. Weiterhin sind Körpermaße für das virtuelle Menschmodell und den Datenhandschuh erforderlich.

Ein wichtiger Punkt ist das eventuelle Auftreten von Cybersickness während des Versuchs, deshalb wird vor dem Versuch die Anfälligkeit der Versuchspersonen mit einem Fragebogen ermittelt. Anschließend an den Versuch wird erfragt, ob die Versuchsperson während des Versuchs durch Cybersickness belastet war. Während der Vorversuche fiel auf, dass die Durchführung des Versuchs für die Versuchspersonen durchaus anstrengend ist. Deshalb wurde ein Fragebogen erstellt, durch den mit allgemeinen Fragen die Beanspruchung der Versuchsperson durch den Versuch aufgenommen wurde.

Um zu erheben, wie tief die Versuchspersonen in die virtuelle Umgebung eingetaucht sind, wird der Präsenzzustand ermittelt. Dazu wird anschließend an den Versuch, noch in der Immersion, ein Fragebogen auf der Basis von Hofmann (2002) verwendet (s. Anhang A). In Tabelle 2 ist eine Zusammenfassung über die gestellten Fragen bzw. Fragebögen und den jeweiligen Zeitpunkt während der Versuchsdurchführung dargestellt.

Tabelle 2: Ermittelte Parameter und verwendete Fragebögen.

Zeitpunkt	Fragen bzw. Fragebögen
Vor dem Versuch	Körper- und Fingergröße
	Händigkeit
	Bestimmung Visus (nach DIN EN ISO 8596)
	Farbsehtest (Velhagen, 1963)
	Stereosehtest (Stereo Optical Company, 1995)
	Augenabstand
	Ausbildung, Tätigkeit
	Sportliche Aktivitäten
	Computernutzung und Erfahrung mit VR-Systemen
	Cybersickness Teil 1
In der Immersion	Präsenzempfinden (adaptiert nach Hofmann, 2002)
Nach dem Versuch	Cybersickness Teil 2
	Belastung durch den Versuch

Sämtliche Fragebögen mit den Ergebnissen sind in Anhang A zu finden.
Damit sich die Versuchspersonen in der virtuellen Versuchsumgebung möglichst gut zu Recht finden, wurde bei der Gestaltung darauf geachtet, dass eine möglichst große Ähnlichkeit zur realen Sitzkiste vorlag. In Abbildung 15 sind beide Umgebungen dargestellt.

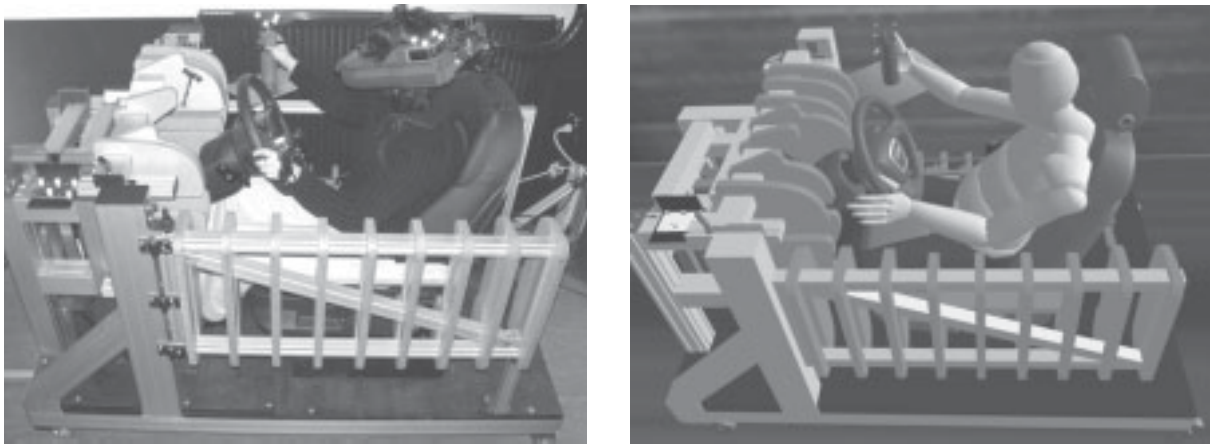


Abbildung 15: Links die Versuchsperson in der realen Umgebung, rechts die dazugehörige virtuelle Versuchsumgebung mit dem virtuellen Menschmodell RAMSIS-VR.

Eine Hauptkomponente des Versuchsaufbaus ist der Versuchszylinder. Für ihn wurde eine Position rechts vom Lenkrad über der Mittelkonsole gewählt, da der Zylinder dort für alle Versuchspersonen gut zu erreichen ist. Weil sich in einigen Fahrzeugen dort der Cupholder befindet, besteht hierdurch ein Bezug zu einer alltäglichen Aufgabenstellung in der virtuellen Sitzkiste. Da die Versuche mit der rechten Hand durchgeführt wurden, kam auch nur der rechte Datenhandschuh zum Einsatz.

Nach einigen Vorversuchen wurden die Bereiche für die zu erzeugende Divergenz festgelegt. Für die translatorische Divergenz ergab sich ein Bereich von 4-40 mm, für die rotatorische Divergenz ein Bereich von 1-13°. Unterhalb der Minimalwerte erfolgte praktisch keine Wahrnehmung der Divergenz, oberhalb der Maximalwerte wurde die Divergenz immer erkannt. In Abbildung 16 sind die jeweiligen maximalen Divergenzen in der virtuellen Umgebung abgebildet.

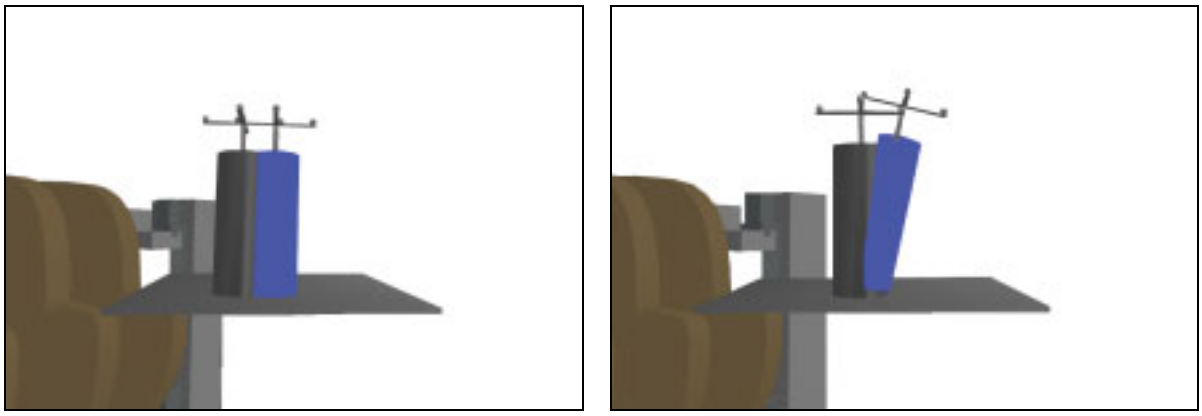


Abbildung 16: Links die maximale translatorische Divergenz von 40 mm, rechts die maximale rotatorische Divergenz von 13°. Der reale Zylinder jeweils blau (für die Versuchsperson nicht sichtbar).

Ebenfalls aus den Vorversuchen wurden die Maße für den Zylinder abgeleitet. Der Durchmesser von 60 mm ist der beste Kompromiss für sehr große und sehr kleine Hände. Die Höhe von 170 mm stellt sicher, dass die Versuchsperson den Zylinder mittig greifen kann, ohne die Grundplatte oder den oberen Rand des Zylinders zu berühren und damit Referenzflächen für die Richtung oder Größe der Divergenz erhalten.

Um den Versuchspersonen eine Eingewöhnung zu ermöglichen, wurde für jede Divergenzart eine Testrunde durchgeführt. Dort hatten die Versuchspersonen die Möglichkeit, das Gefühl der Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung und die vier entsprechenden Divergenzrichtungen kennen zu lernen.

Es wurde darauf geachtet, dass Versuchsbedingungen und -abläufe für alle Versuchspersonen gleich waren. Die Versuche liefen dabei folgendermaßen ab:

- Die Versuchsperson wurde hinsichtlich Körper- und Handgröße vermessen.
- Nach dem Einsteigen in die Sitzkiste konnte die Versuchsperson Sitz und Lenkrad passend einstellen.
- Durchführen von Farb- und Stereosehtest, anschließend wurde das HMD angepasst.
- Einkalibrieren des rechten Datenhandschuhs.
- Die Versuchsperson beantwortete die Fragen zur Person und den Fragebogen zu Cybersickness Teil 1.

- Nachdem die Aufgabenstellung erläutert wurde, folgte eine Testrunde zur translatorischen Divergenz. Anschließend wurde die Wahrnehmungsschwelle mit dem Herstellungsverfahren ermittelt.
- Nach der Erläuterung der Aufgabenstellung und der anschließenden Testrunde zur rotatorischen Divergenz erfolgte die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle mit dem Herstellungsverfahren.
- Damit die Versuchsperson sich etwas erholen konnte, gab es eine fünfminütige Pause.
- Erneute Testrunde für die translatorische Divergenz, anschließend wurden die Wahrnehmungsschwellen mit dem Konstanzverfahren ermittelt.
- Testrunde zur rotatorischen Divergenz, sowie Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle mit dem Konstanzverfahren.
- Nachdem die Versuchsperson den Fragebogen zum Präsenzempfinden in der Immersion beantwortet hatte, konnte sie HMD und Datenhandschuh wieder ablegen.
- Die Versuchsperson beantwortete die Fragebögen zur Cybersickness Teil 2 und zur Belastung durch den Versuch.

Die Versuchsergebnisse sind samt Analyse in Kapitel 2.1.3 zu finden.

2.1.2 Versuche in realer Umgebung

Im Folgenden wird die Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen realer und haptischer Wahrnehmung in realer Umgebung beschrieben. Bei der gesamten Untersuchung wurde darauf geachtet, die Versuchsumgebung und die Versuchsdurchführung exakt so zu gestalten, wie bei den Versuchen in virtueller Umgebung.

2.1.2.1 Versuchsaufbau

Als Basis für den Versuchsaufbau wurde dieselbe variable Sitzkiste verwendet wie für die Versuche in virtueller Umgebung. Um die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung ohne VR-System zu erzeugen, wurde eine Spiegel-konstruktion entworfen und aufgebaut (s. Abbildung 17). Dabei wurde insbesondere

darauf geachtet, dass sich der Versuchsaufbau exakt an derselben Position befindet wie der Versuchsaufbau für die Versuche in virtueller Umgebung. Um zu verhindern, dass die Versuchspersonen bei der Verschiebung des sichtbaren Zylinders die Umgebung im Spiegel als Referenz verwenden, wurde eine Sichtabschirmung installiert.

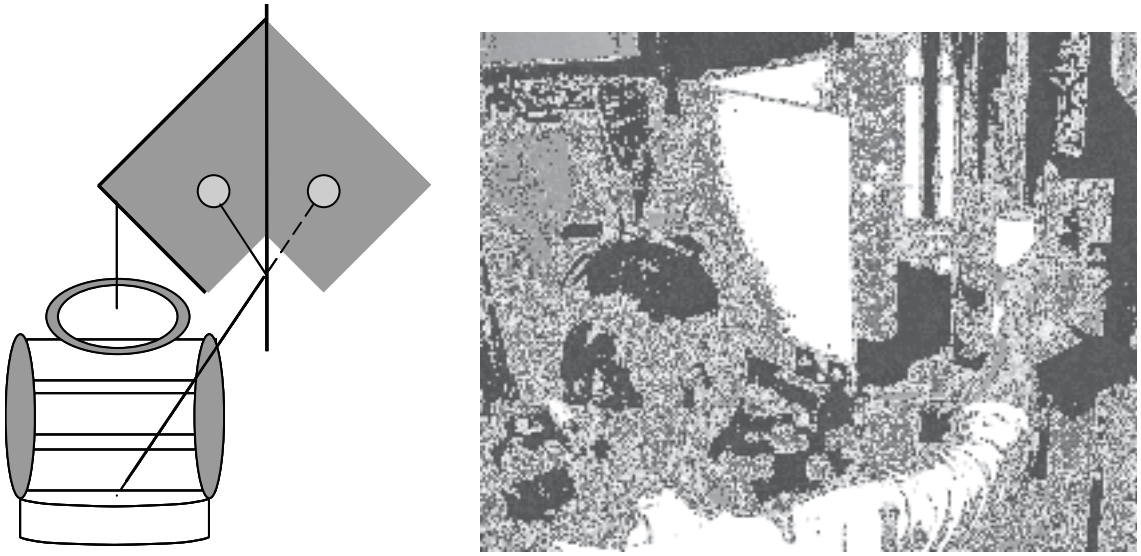


Abbildung 17: Versuchsaufbau für Versuche in realer Umgebung (links: Schematische Darstellung, rechts Versuchsperson während des Versuchs).

2.1.2.2 Versuchsdurchführung

Die Ermittlung der Wahrnehmungsschwellen bei den Versuchen in realer Umgebung glich exakt dem Vorgehen in virtueller Umgebung (s. Kapitel 2.1.1.2). Die Reihenfolge der Aufgabenstellungen und die Zuordnung der Versuchspersonen zu der jeweiligen Gruppe wurden ebenso beibehalten wie die kurzen Testrunden zur Eingewöhnung der Versuchspersonen. Um sicher feststellen zu können, ob die Sehfähigkeit der Versuchspersonen einen Einfluss auf das Ergebnis hat, wurde vor Versuchsbeginn der Visus (Grad der Sehschärfe) mit einem Binoptometer ermittelt.

Die Versuchsergebnisse sowie eine ausführliche Analyse sind in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

2.1.3 Zusammenführung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden nun die Ergebnisse aus beiden Versuchsreihen vorgestellt und miteinander verglichen, um auf dieser Basis eine Aussage über die Qualität des VR-Systems machen zu können. Zu Beginn wird kurz die Datenaufbereitung erläutert.

2.1.3.1 Datenaufbereitung

Die Analyse der Daten ergab, dass bei vielen Versuchspersonen die Ergebnisse nicht symmetrisch waren. Das heißt, die Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz war in die eine Richtung höher oder niedriger als in die andere. Eine Betrachtung über alle Versuchspersonen ließ aber keine Häufigkeiten in eine Richtung erkennen. Weiterhin lag kein Unterschied zwischen virtueller und realer Umgebung vor. Ein Systemfehler, der durch das Versuchsdesign hervorgerufen wurde, kann somit ausgeschlossen werden.

Viele Versuchspersonen hatten während der Versuche Probleme, die korrekte Überlagerung vom virtuellen Zylinder mit dem realen als solche zu erkennen. Diese Beobachtung lässt sich durch die Ergebnisse von Ernst (2001) und Hofmann (2002) erklären, die eine mentale Repräsentation des Objektes beschreiben, die oftmals nicht exakt mit der realen Position übereinstimmt.

Um den daraus resultierenden Fehler zu eliminieren, wurde eine individuelle Wahrnehmungsschwelle W_i eingeführt, die sich auf die individuelle Nullstellung jeder Versuchsperson bezieht. Dazu werden die Ergebnisse der beiden aufgenommenen Wahrnehmungsschwellen W_1 und W_2 gemittelt. Basierend auf dieser Formel wurde jede ermittelte Wahrnehmungsschwelle neu berechnet.

Individuelle Wahrnehmungsschwelle: $$W_i = \frac{W_1 + W_2}{2} . \qquad (1)$$

Eine notwendige Bedingung für die Reliabilität der Ergebnisse ist die Bestätigung des Herstellungsverfahrens durch das Konstanzverfahren. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse des entsprechenden t-Tests dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse des t-Tests (Signifikanzniveau α) für den Vergleich von Herstellungs- und Konstanzverfahren, aufgeteilt nach Versuchspersonengruppe, Divergenzart und realer Umgebung bzw. virtueller Umgebung.

Herstellungsverfahren vs. Konstanzverfahren : t-Test, ungepaarte Stichprobe, zweiseitig							
Gruppe vorne/hinten				Gruppe links/rechts			
Translatorische Divergenz		Rotatorische Divergenz		Translatorische Divergenz		Rotatorische Divergenz	
Virtuelle Umgebung	Reale Umgebung	Virtuelle Umgebung	Reale Umgebung	Virtuelle Umgebung	Reale Umgebung	Virtuelle Umgebung	Reale Umgebung
0,65	0,86	0,27	0,29	0,50	0,66	0,27	0,23

Das Signifikanzniveau liegt bis auf einen Fall oberhalb von α=0,25 und sagt somit nach Bortz (1993) aus, dass kein Unterschied zwischen den Ergebnissen vorliegt. Das Signifikanzniveau für die rotatorische Divergenz bei der Gruppe links / rechts in realer Umgebung liegt im Bereich der statistischen Unbestimmtheit, hier ist keine Aussage möglich. Eine Gesamtbetrachtung der Ergebnisse zeigt allerdings, dass in sieben von acht Fällen das Herstellungsverfahren durch das Konstanzverfahren bestätigt wird. Deshalb werden im Folgenden auch für die rotatorische Divergenz bei der Gruppe links / rechts in realer Umgebung die Werte des Herstellungsverfahrens verwendet.

Die Bestätigung des Herstellungsverfahrens durch das Konstanzverfahren ist wichtig für das Gesamtergebnis. Weiterhin erhöht sich durch das Untersuchen von zwei verschiedenen Divergenzarten die Aussagekraft der Ergebnisse. Um die Versuchsdauer im Rahmen zu halten, wurde dafür die Unterteilung in zwei Versuchsgruppen nötig. Nach der Bestätigung des Herstellungsverfahrens durch das Konstanzverfahren ergab sich für jede der 43 Versuchspersonen ein Ergebnis für jede Divergenzart in Abhängigkeit der Versuchsumgebung. Im folgenden Kapitel wird nun der Vergleich der Ergebnisse durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse soll zu einer Aussage über die Qualität der virtuellen Umgebung führen.

2.1.3.2 Ergebnisse für die translatorische Divergenz

Die Ergebnisse der Wahrnehmungsschwellen für die translatorische Divergenz in realer und in virtueller Umgebung sind, jeweils bezogen auf die beiden Versuchsgruppen, in Abbildung 18 dargestellt.

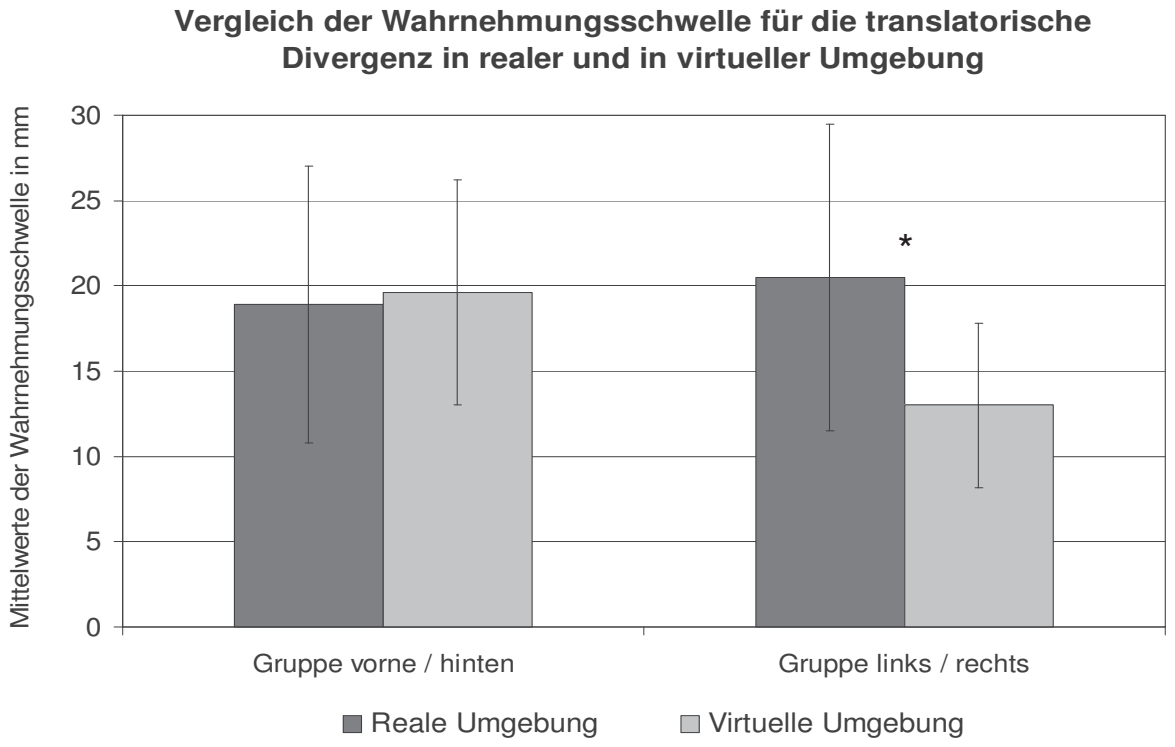


Abbildung 18: Vergleich der mittleren Wahrnehmungsschwellen in realer und in virtueller Umgebung für die translatorische Divergenz (mit Standardabweichungen). Vergleiche mit signifikant unterschiedlichem Ergebnis sind mit „“ gekennzeichnet (p<0.05).*

Für die Gruppe, die in die Divergenzrichtungen vorne / hinten getestet wurden (vgl. Abbildung 14) zeigen die Ergebnisse kaum einen Unterschied zwischen der realen Umgebung mit 18,9 mm (Standardabweichung 8,1 mm) und der virtuellen Umgebung mit 19,6 mm (Standardabweichung 6,6 mm). Dies wird durch das Ergebnis des t-Test bestätigt. Bei der Gruppe, die in die Richtungen links / rechts getestet wurde liegen allerdings signifikante Unterschiede vor, der Mittelwert in realer Umgebung liegt mit 20,5 mm (Standardabweichung 9 mm) um 7,5 mm über dem in virtueller Umgebung mit 13 mm (Standardabweichung 4,8 mm). Dieser Unterschied wird durch das Ergebnis des t-Test bestätigt (vgl. Anhang B).

Zusammenfassend kann man also feststellen, dass lediglich das Ergebnis der Gruppe links / rechts in virtueller Umgebung von den anderen Ergebnissen abweicht.

Da die Versuchsbedingungen bei allen Versuchen gleich waren, ist die Ursache dafür im direkten Zusammenhang mit der Aufgabenstellung bzw. dem Versuchsaufbau zu suchen.

Um die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung zu erzeugen, werden realer und virtueller Zylinder gegeneinander verschoben. Greift die Versuchsperson nach dem realen Zylinder, schneidet die virtuelle Hand zwangsläufig in den virtuellen Zylinder ein. Dabei schneidet die virtuelle Hand umso tiefer ein, je größer die Divergenz ist. In Abbildung 19 ist dieser Fall für die maximal getestete Divergenz von 40 mm dargestellt.

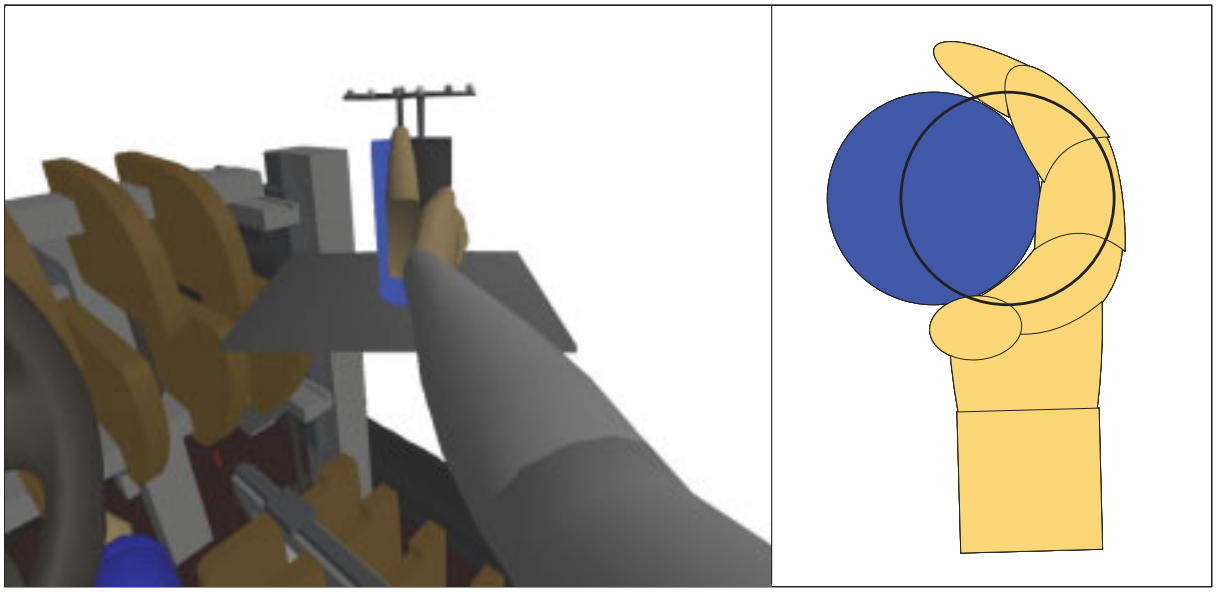


Abbildung 19: Einschneiden der virtuellen Hand in den virtuellen Zylinder bei einer Divergenz von 40 mm zwischen realem Zylinder (blau, für die Versuchsperson nicht sichtbar) und virtuellem Zylinder (schwarz). Links die Sicht der Versuchsperson, rechts eine Skizze der Draufsicht.

Die Ergebnisse der Gruppe vorne / hinten werden von diesem Umstand nicht beeinträchtig. Dies lässt sich wie folgt erklären. Steht der virtuelle Zylinder weiter weg als der reale, kommt es zwar zu einem Einschneiden der Finger, dies wird aber durch Hand und Zylinder verdeckt. Im umgekehrten Fall schneidet die Hand zwar ebenfalls in den virtuellen Zylinder ein, das kann von der Versuchsperson aber erst gesehen werden, wenn die Divergenz größer als die Tiefe der virtuellen Hand ist.

2.1.3.3 Ergebnisse für die rotatorische Divergenz

In Abbildung 20 sind, unterteilt nach den beiden Versuchsgruppen, die Wahrnehmungsschwellen für die rotatorische Divergenz in realer und in virtueller Umgebung dargestellt.

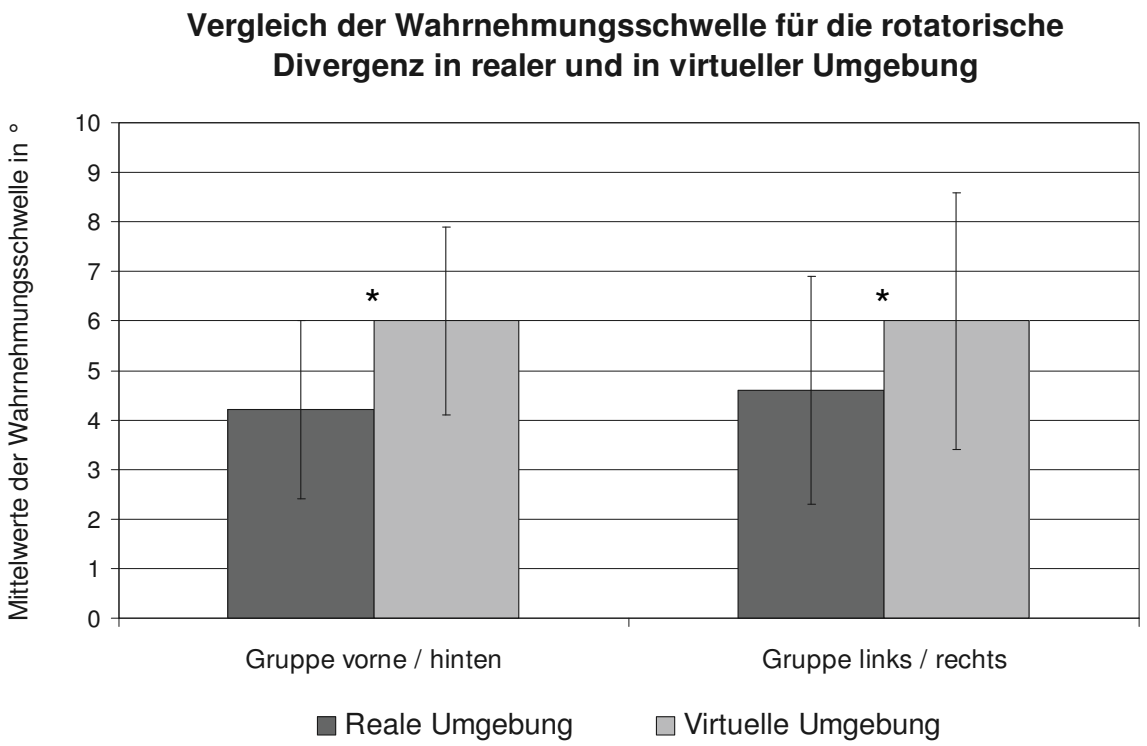


Abbildung 20: Vergleich der mittleren Wahrnehmungsschwellen in realer und in virtueller Umgebung für die rotatorische Divergenz (mit Standardabweichungen). Vergleiche mit signifikant unterschiedlichem Ergebnis sind mit „“ gekennzeichnet (p<0.05).*

Die Ergebnisse zeigen für die Gruppe vorne / hinten einen Unterschied zwischen realer Umgebung mit 4,2° (Standardabweichung 1,8°) und in virtueller Umgebung mit 6° (Standardabweichung 1,9°). Dieser Unterschied wird durch den t-Test bestätigt (vgl. Anhang B). Für die Gruppe links / rechts liegt mit 4,6° (Standardabweichung 2,3°) für die reale Umgebung und 6° (Standardabweichung 2,3°) für die virtuelle Umgebung ebenfalls ein signifikanter Unterschied vor. Also erkennen die Versuchspersonen in der realen Umgebung kleinere Abweichungen als in der virtuellen.

Dieses Ergebnis wirft nun einige Fragen auf. Im Gegensatz zu den Ergebnissen für die translatorische Divergenz liegt hier also bei beiden Gruppen ein signifikanter Unterschied vor. Da beide Aufgabenstellungen sowohl in realer als auch in virtueller Umgebung immer zusammen untersucht wurden, ist die Ursache nicht mit Effekten durch Versuchsaufbau oder -durchführung zu erklären. Somit scheidet das VR-System als Verursacher an sich aus. Da die Ergebnisse für die translatorische Divergenz aussagen, dass kein Unterschied zwischen virtueller und realer Umgebung vorliegt, muss die Störgröße bei der Erkennung der rotatorischen Divergenz auftreten.

Eine mögliche Einflussquelle kann der Datenhandschuh sein, durch seine Befestigung an der Hand stört dieser an zwei Stellen die Wahrnehmung der rotatorischen Divergenz. Die Fingerkuppen werden durch die Fingerklammern leicht zusammengedrückt, sodass dort ein Dauerreiz anliegt. Außerdem verläuft der Riemen für den Marker quer über die Handinnenfläche und erschwert so den Kontakt zwischen Handfläche und Greifzylinder.

Die Frage, ob die höhere Wahrnehmungsschwelle in virtueller Umgebung wirklich auf den Datenhandschuh zurückzuführen ist, wurde in einer weiteren Versuchsreihe untersucht. Versuchsaufbau und -durchführung fanden analog zu den Versuchen in realer Umgebung statt. Allerdings wurden die insgesamt zehn Versuchspersonen mit dem Datenhandschuh ausgestattet. In Abbildung 21 ist das Ergebnis im Bezug zu den vorherigen Untersuchungen dargestellt.

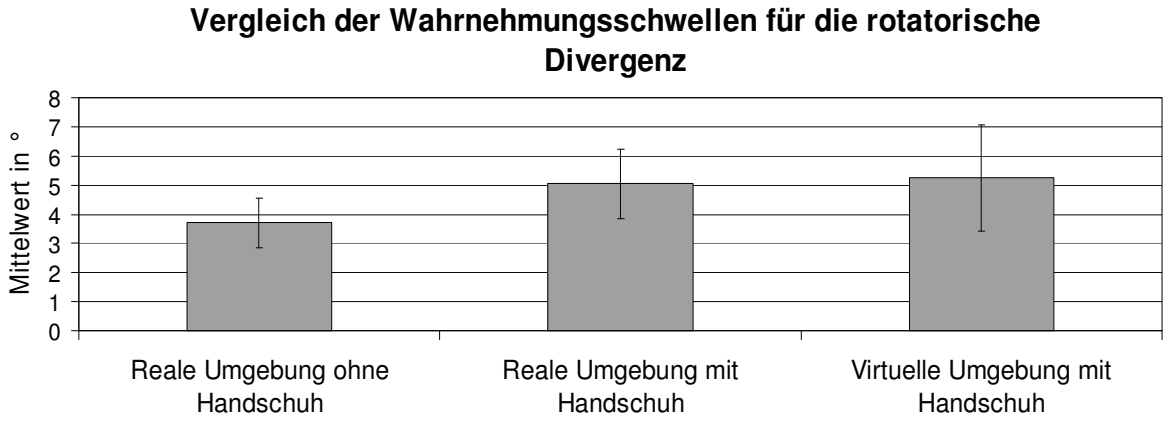


Abbildung 21: Vergleich der mittleren Wahrnehmungsschwellen für die rotatorische Divergenz in Abhängigkeit von Datenhandschuh und Umgebung (mit Standardabweichungen).

Die Ergebnisse in realer Umgebung zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den Wahrnehmungsschwellen mit Datenhandschuh 5,1° (Standardabweichung 0,9°) und ohne Datenhandschuh 3,7° (Standardabweichung 1,2°) auf. Das Ergebnis in virtueller Umgebung mit Datenhandschuh gleicht mit 5,3° (Standardabweichung 1,8°) fast dem Ergebnis in realer Umgebung mit Datenhandschuh. Der t-Test bestätigt einen Unterschied zwischen „Reale Umgebung ohne Handschuh“ und „Reale Umgebung mit Handschuh“ und keinen Unterschied zwischen „Reale Umgebung mit Handschuh“ und „Virtuelle Umgebung ohne Handschuh“ (vgl. Anhang B).

Die Versuchsreihe bestätigt, dass die Erkennung der rotatorischen Divergenz durch den Datenhandschuh erschwert wird. Dies bedeutet, dass der Datenhandschuh die Ursache für die höheren Wahrnehmungsschwellen in virtueller Umgebung ist und nicht die virtuelle Umgebung selbst.

2.1.3.4 Minimale Wahrnehmungsschwelle in virtueller Umgebung

Mit Hilfe der minimalen Wahrnehmungsschwelle in virtueller Umgebung soll ein Richtwert für die maximal unbemerkte Abweichung von visualisierter Geometrie und haptischem Feedback gegeben werden. Dieser Richtwert soll Anwendern bei der Gestaltung von virtuellen Umgebungen helfen, ein möglichst realistisches haptisches Feedback zu erzeugen. In Tabelle 4 sind die minimalen Wahrnehmungsschwellen abgebildet. Die Berechnung erfolgt auf der Basis einer fünf Prozentschwelle. Dies bedeutet, dass nur fünf Prozent der Anwender die Abweichung der Divergenz erkennen konnten, wenn sie nach dem unten beschrieben Richtwert eingestellt würde.

Tabelle 4: Minimale Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von Divergenz und Versuchspersonengruppe.

Divergenz	translatorisch		rotatorisch	
Gruppe	V/H	R/L	V/H	R/L
Minimale Wahrnehmungsschwelle	11 mm	6 mm	2°	2°

Während die minimale Abweichung, und damit der Richtwert, für die rotatorische Divergenz mit zwei Grad für beide Versuchspersonengruppen gleich ist, tritt bei der translatorischen Divergenz eine Abweichung auf. Wie schon in Kapitel 2.1.3.2 erläutert, ist die Wahrnehmungsschwelle für die Versuchspersonengruppe rechts / links geringer, weil das Einschneiden der virtuellen Hand ein Erkennen der Divergenz erleichtert. Dieser systembedingte Effekt kommt natürlich bei allen Bauteilen vor, bei denen eine Divergenz auftritt. Somit ist es sinnvoll, den Richtwert für die minimale Abweichung zwischen virtueller und realer Geometrie auf sechs Millimeter festzulegen.

2.1.4 Diskussion

Zu Beginn soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die mit dem Herstellungsverfahren ermittelten Wahrnehmungsschwellen durch das Konstanzverfahren bestätigt wurden. Darauf basierend konnten die Ergebnisse innerhalb der beiden Versuchspersonengruppen zusammengefasst werden. So entstand eine mittlere Wahrnehmungsschwelle für jede Divergenz in Abhängigkeit von Versuchspersonengruppe und Umgebung.

Eine Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung in realer Umgebung und in der hier verwendeten virtuellen Umgebung gleich ist. Dies trifft sowohl für die translatorische als auch für die rotatorische Divergenz zu.

Allerdings lassen sich auch zwei Arten von Störgrößen identifizieren, deren Einflüsse zu Abweichungen führen. Einerseits systembedingte Störgrößen, wie das Einschneiden der virtuellen Hand in den virtuellen Zylinder. Dieser Effekt ist eine Eigenheit von VR-Systemen und kann kaum umgangen werden. Andererseits entstehen Einflüsse durch den Versuchsaufbau, in diesem Fall durch den Datenhandschuh.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Qualität des VR-Systems ausreichend ist, um damit eine komplexe Situation wie die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung so zu erzeugen, dass sie wahrnehmbar ist. Für diese Aussage müssen allerdings gewisse Einschränkungen getroffen werden. Beispielsweise wurde bei der Gestaltung der virtuellen Versuchsumgebung darauf geachtet, dass die Grafikberechnung ausreichend leistungsfähig ist. Somit kann das Ergebnis für eine schlechte Grafikleistung unter 15 Bildern pro Sekunde nicht verallgemeinert werden. Wenn die technische Weiterentwicklung im selben Tempo wie bisher voranschreitet, werden zukünftige VR-Systeme diese Grenze auch bei großen Datenmengen problemlos überschreiten können, sodass diese Einschränkung wegfällt.

Auf Basis der hier ermittelten Ergebnisse lässt sich für den Einsatz von VR-Systemen eine wichtige Aussage treffen. Die Integration von haptischem Feedback muss nur hinreichend genau sein. Auch wenn sich diese Aussage in erster Linie nur auf die hier untersuchten Anwendungsfälle bezieht, können doch einige

Verallgemeinerungen gemacht werden. Da die Wahrnehmungsschwellen in beiden Umgebungen gleich sind, gibt es keine ersichtlichen Gründe, wieso die ergonomischen Richtwerte aus der realen Umgebung nicht auch in der virtuellen gelten sollen.

Damit die Abweichung mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5% vom Anwender bemerkt wird, sollte eine translatorische Divergenz von 6 Millimetern nicht überschritten werden. Dieser Wert liegt im Regelfall oberhalb der Messgenauigkeit eines Einmessens per Hand und Maßstab, sodass eine ausreichend genaue Einstellung des haptischen Feedbacks möglich ist.

Für die rotatorische Divergenz liegt die Wahrnehmungsschwelle für die 5-Prozent-Schwelle bei 2°. Allerdings ist hier eine Umsetzung in Gestaltungsvorschriften komplizierter. Während die Ermittlung von rotatorischer und translatorischer Divergenz in den Versuchsreihen klar getrennt war, ist dies bei der Integration von haptischem Feedback nicht so einfach. Sobald sich die Hand vom Drehpunkt eines ungenau eingemessenen Bauteils entfernt, kommt zu der rotatorischen auch eine translatorische Divergenz hinzu. Der Richtwert für die rotatorische Divergenz gilt also nur im Drehpunkt des Objektes. In der praktischen Umsetzung bei der Integration von haptischem Feedback dürfte somit der Richtwert für die translatorische Divergenz die wesentlich wichtigere Rolle spielen.

Setzt man die ermittelte Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung in Bezug zu den von Blankenfeld (2002) und HdE (1989) ermittelten Werten für die Tiefensensibilität des Hand-Arm-Systems, kommt man zur folgenden Aussage. Wird die visuelle Komponente bei der gezielten Greifbewegung mit einbezogen, ist die Genauigkeit wesentlich höher als die ermittelte Wahrnehmungsschwelle. Auf die letztendliche Aussage, dass ein haptisches Feedback nur 6 mm genau positioniert werden muss, haben diese Ergebnisse keinen Einfluss, da die Ungenauigkeit in der menschlichen Tiefensensibilität ein Bestandteil der Messergebnisse ist.

Eine weitere Schlussfolgerung ist, dass der Mensch offensichtlich die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung wesentlich schlechter erkennt, als rein visuelle bzw. rein haptische Unterschiede. Diese Aussage deckt sich mit der von

Ernst (2001). Er weist für seine Versuchsanordnung (vgl. Kapitel 1.3) nach, dass crossmodale Wahrnehmungsschwellen größer sind als intermodale.

Wie in Kapitel 2.1.1.1.5 bereits erläutert, ist der größte Nachteil des verwendeten HMD das im Vergleich zum Menschen geringe Field-of-View. Der Nachteil dürfte bei dieser Versuchsanordnung allerdings kaum einen Einfluss haben, da die Versuchspersonen sich hier nur auf einen Zylinder im primären Blickfeld konzentrieren mussten. Wie sich die Einschränkung des Field-of-View bei anderen Aufgabenstellungen auf die Wahrnehmung auswirkt, wird in Kapitel 2.2 näher untersucht.

Zusammenfassend lässt sich nun festhalten, dass die Qualität des VR-Systems für die hier durchgeführten Versuche als ausreichend angesehen werden kann. Die Hauptaufgabe, das Visualisieren von virtueller Geometrie, wurde vom System so gut gelöst, dass kein Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung festgestellt werden konnte. Nun ergibt sich die Frage, ob dieses Ergebnis auch für andere Fragestellungen in der virtuellen Umgebung zu verallgemeinern ist.

Ob diese Vermutung zutrifft und sich das VR-System auch für die Beantwortung von alltäglichen Fragestellungen eignet, wird im folgenden Kapitel untersucht.

2.2 Vergleich der Bewertung eines Fahrzeugmodells in realer und in virtueller Umgebung

Um die Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit zu untersuchen, ist es zusätzlich zu den Versuchen aus den Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2 von Bedeutung, die subjektive und individuelle Bewertung ergonomischer Fragestellungen in virtueller und in realer Umgebung miteinander zu vergleichen. Um einen möglichst allgemeingültigen Vergleich durchzuführen, wurde in diesem Fall auf eine alltägliche Fragestellung zurückgegriffen und ein Fahrzeugmodell aus dem Entwicklungsprozess gewählt (vgl. auch Voß, 2007).

2.2.1 Konzeption

Bei der Bewertung eines realen Fahrzeugmodells im Rahmen einer Probandenstudie ist eine Vielzahl von ergonomischen Fragestellungen zu berücksichtigen. Für den hier durchgeführten Vergleich ist es wichtig, möglichst viele dieser Fragestellungen zu verwenden. Allerdings können in der Virtuellen Sitzkiste systembedingt nicht alle visualisiert und abgefragt werden, z.B. wurde auf die Bewertung des Ein- und Ausstiegs verzichtet.

Die ergonomischen Fragestellungen lassen sich grundlegend in Sicht- und Greifuntersuchungen aufteilen. Eine getrennte Bewertung ist hier sinnvoll, da bei den Greifuntersuchungen mit RamsisVR, Datenhandschuh und Kollisionserkennung drei zusätzliche Systemkomponenten verwendet werden. In Tabelle 5 sind die ausgewählten Fragestellungen aufgeführt.

Tabelle 5: Ergonomische Fragestellungen.

Sichtuntersuchungen	Greifuntersuchungen
• Sicht auf das Kombiinstrument	• Fensterheber Erreichbarkeit
• Mitteldisplay Lage/ Sichtbarkeit	• Türinnenbetätigung Erreichbarkeit
• Klimabedienteil Auffindbarkeit	• Armauflage Tür Nutzbarkeit
• Sichtbeeinträchtigung durch Säulen	• Cupholder Erreichbarkeit
• Raumgefühl	• Klimabedienteil Erreichbarkeit
• Kopffreiheit	• Handschuhkastenöffner Erreichbarkeit

Bei den ausgewählten Sichtuntersuchungen wurde darauf geachtet, neben der Sichtbarkeit von Bedienelementen auch subjektive Faktoren wie das Raumgefühl abzufragen. Die Fragestellungen für die Greifuntersuchungen beziehen sich auf Erreichbarkeiten, nur bei „Armauflage Tür“ sollte die Nutzbarkeit bewertet werden.

Die Bewertung der Fragestellungen erfolgte anhand eines Fragebogens, der auf einer Schulnotenskala basiert. Da die Fragebögen in den beiden Versuchsreihen unterschiedliche Umfänge aufwiesen, kam hier nur die Schnittmenge zur Auswertung. Insgesamt haben zwölf Versuchspersonen an den beiden Versuchsreihen teilgenommen. Es wurden jeweils dieselben Versuchspersonen verwendet.

Alle teilnehmenden Versuchspersonen hatten bereits an früheren Untersuchungen in realer Umgebung teilgenommen, sodass Ihnen Fragestellung und Bewertungsschema bekannt waren.

2.2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

2.2.2.1 Versuche in virtueller Umgebung

Das virtuelle Fahrzeugmodell wurde mit der Virtuellen Sitzkiste visualisiert, die bereits in Kapitel 2.1.1.1 ausführlich beschrieben worden ist. Als zusätzliche Funktion kommt hier eine Kollisionserkennung zum Einsatz. Diese registriert, wenn sich virtuelle Geometrien schneiden und färbt diese dann ein. Die Kollisionserkennung kann sowohl Überschneidungen zwischen getrackten und ungetrackten Geometrien untereinander, als auch solche mit dem virtuellen Menschmodell RAMSIS-VR feststellen. Somit bekommt der Anwender eine exakte Rückmeldung, wann und wo sich Flächen berühren. Dadurch wird die Interaktion mit der virtuellen Umgebung erheblich erleichtert.

Die Erzeugung des virtuellen Menschmodells für die Versuchsperson sowie das Anlegen der Datenhandschuhe und HMD erfolgt analog zu den Greifversuchen in virtueller Umgebung (s. Kapitel 2.1.1). Um eine Bewertung in der Immersion durchführen zu können, wird der Fragebogen vom Versuchsleiter vorgelesen.

Der Versuch in virtueller Umgebung lief wie folgt ab:

- Die Versuchsperson wird hinsichtlich Körper- und Handgröße vermessen.
- Nachdem die Versuchsperson Platz genommen hat, kann sie Sitz und Lenkrad richtig einstellen und HMD und Datenhandschuhe anlegen. Anschließend kann die Sitzposition noch einmal korrigiert werden (vgl. Lorenz, Kaiser, Assmann, Engstler und Zöllner, 2008).
- Zu Beginn gibt es eine kurze Eingewöhnungsphase für die Versuchsperson um sich mit der virtuellen Umgebung vertraut zumachen. Parallel dazu wird Aufgabenstellung und Fragebogen erläutert.
- Beginn des Versuchs und Abarbeiten des Fragebogens.
- Während des Versuchs ist nur die Reihenfolge durch den Fragebogen vorgegeben, ansonsten unterliegt die Versuchsperson keinen Restriktionen.

- Nach dem Ende des Versuchs darf die Versuchsperson HMD und Datenhandschuhe ablegen, anschließend wird gefragt, ob Unwohlsein bzw. Cybersickness aufgetreten sind.

2.2.2.2 Versuche in realer Umgebung

Für die Versuche in realer Umgebung wird ein Fahrzeugmodell verwendet, das auf der Basis der virtuellen Daten hergestellt wurde. Dabei handelt es sich um ein 1:1 Mock-Up aus Holz bzw. Modellbauschäumen (s. Abbildung 22), mit dem Interieur und Exterieur dargestellt wird. Zur korrekten Abbildung des Fahrerarbeitsplatzes werden Sitz, Lenkrad und Pedalerie sowie die Schaltung durch Serienteile abgebildet.

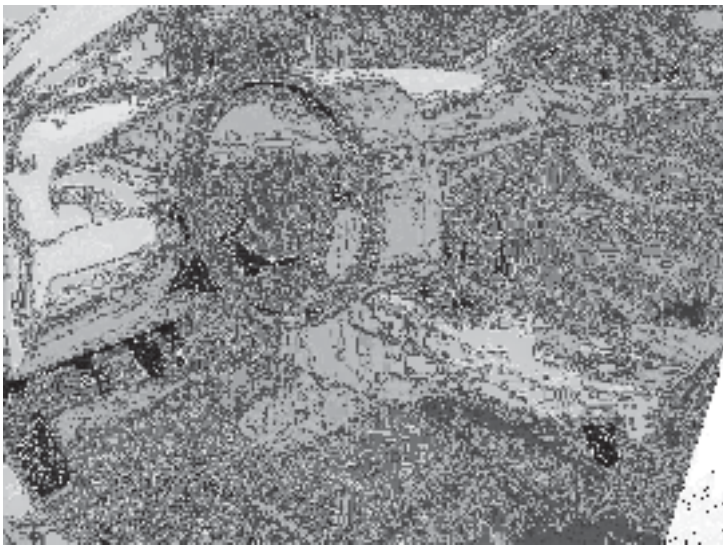


Abbildung 22: Beispiel eines 1:1 Mock-Ups.

Die Versuche in realer Umgebung laufen bis auf den VR-spezifischen Teil analog zu den Versuchen in virtueller Umgebung ab. Bei der Bewertung des virtuellen Fahrzeugmodells wurde der Fragebogen vom Versuchsleiter vorgelesen, damit die Versuchsperson die Immersion nicht verlassen musste. Bei der Bewertung des realen Fahrzeugmodells haben die Versuchspersonen den Fragebogen selbst ausgefüllt. Außer der Reihenfolge der Fragen werden hier ebenfalls keine Restriktionen vorgegeben.

2.2.3 Zusammenführen der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse vorgestellt und interpretiert. Für die Analyse eventueller Unterschiede wird davon ausgegangen, dass die Ursachen dafür in der virtuellen Umgebung bzw. im dazugehörigen Versuchsaufbau zu finden sind.

In Abbildung 23 ist die Bewertung der ergonomischen Fragestellungen für den Bereich der Sichtuntersuchung abgebildet. Dazu wurde für jede Fragestellung der Mittelwert von den Ergebnissen der Versuchspersonen berechnet.

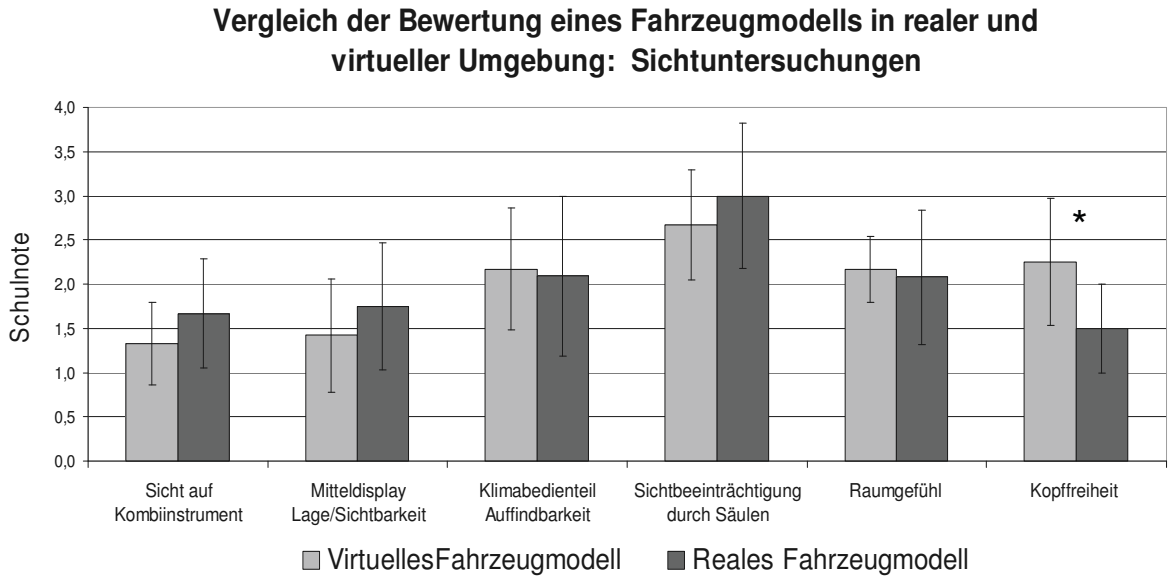


Abbildung 23: Ergebnisse der Sichtuntersuchungen (mit Standardabweichungen). Die Fragestellungen mit signifikant unterschiedlicher Bewertung sind mit „“ gekennzeichnet (p<0.05).*

Die Ergebnisse aus Abbildung 23 zeigen, dass bei nahezu allen bewerteten Fragestellungen kein Unterschied vorliegt, was durch den t-Test bestätigt wird. Der Punkt „Sicht auf Kombiinstrument“ liegt allerdings im statistisch unbestimmten Bereich. Beim Punkt „Kopffreiheit“ gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen der Bewertung in virtueller und in realer Umgebung. Dieser Unterschied lässt sich durch das HMD erklären, es schränkt das vertikale Gesichtsfeld oben von 55° um 21,5° auf 33,5° ein (Kapitel 2.1.1.1.5). Dadurch kann die Versuchsperson in virtueller Umgebung nicht den Fahrzeughimmel vor der Stirn sehen, sondern nur die Sonnenblende. Da der Himmel aber vor der Stirn noch einmal ansteigt, wird die Kopffreiheit in realer Umgebung tendenziell besser bewertet. Eine vollständige Auflistung der Ergebnisse ist in Anhang C dargestellt.

In Abbildung 24 ist die Bewertung der ergonomischen Fragestellungen aus dem Bereich der Greifuntersuchungen abgebildet.

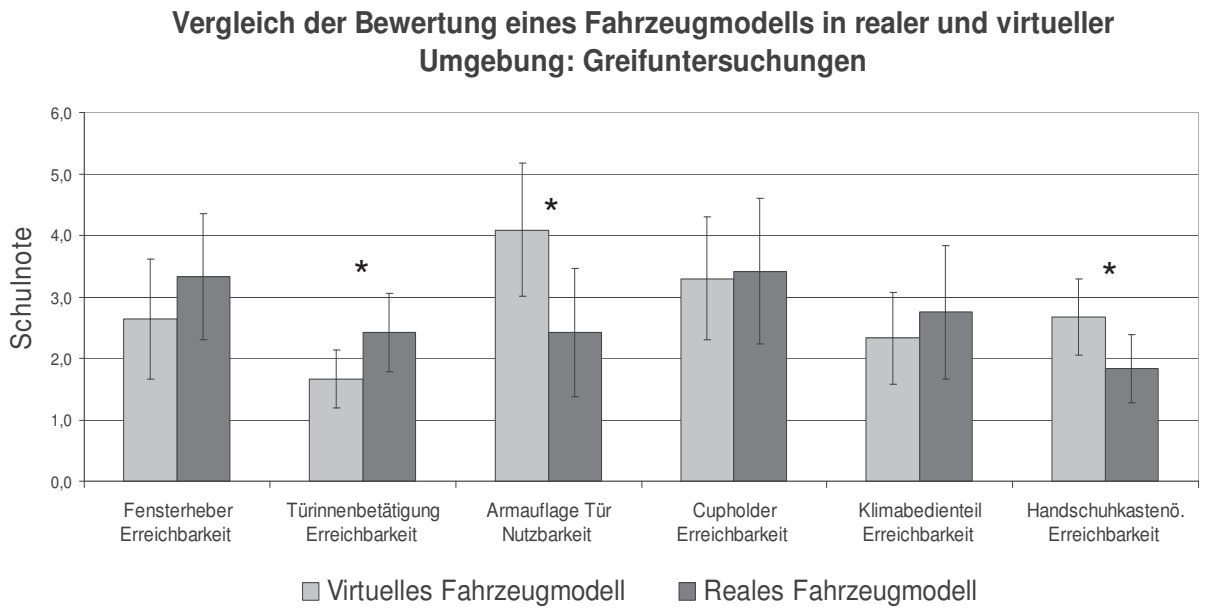


Abbildung 24: Ergebnisse der Greifuntersuchungen (mit Standardabweichungen). Die Fragestellungen mit signifikant unterschiedlicher Bewertung sind mit „“ gekennzeichnet (p<0.05).*

Die Ergebnisse aus Abbildung 24 zeigen, dass die drei Fragestellungen „Erreichbarkeit Türinnenbetätigung“ und „Nutzbarkeit Armauflage“, sowie „Erreichbarkeit Handschuhkastenöffner“ in beiden Umgebungen unterschiedlich bewertet werden. Alle anderen Ergebnisse sind laut t-Test nicht unterschiedlich (s. Anhang C). Eine einzelne Analyse der drei unterschiedlich bewerteten Fragestellungen soll nun die Ursachen ermitteln.

Um die Erreichbarkeit zu bewerten, bewegt die Versuchsperson ihre Hand zu der Position, wo sich in der virtuellen Umgebung die visualisierten Flächen befinden. Schneidet die virtuelle Hand in die Flächen ein, werden die betroffenen Teile von Hand und Fahrzeug durch die Kollisionserkennung grün eingefärbt. Somit kann die Versuchsperson sicher sein, dass sie die korrekte Position erreicht hat.

Die aufgetreten Abweichungen in der Bewertung lassen sich wie folgt erklären. Im Fall „Erreichbarkeit Türinnenbetätigung“ war im realen Fahrzeugmodell ein Serienteil eingebaut, sodass neben der Ablage bzw. dem Einhängen der Finger in den Griff auch eine Bedienung möglich war. Dadurch wird aufgrund der Position von Sitz und Türinnenbetätigung eine Zwangshaltung im Handgelenk erzeugt, die als unangenehm bewertet wird. Aus diesem Grund wird die Erreichbarkeit in realer

Umgebung tendenziell schlechter bewertet. Dies zeigt, dass die Versuchspersonen zwei unterschiedliche Fragestellungen bewertet haben. In der virtuellen Umgebung wurde nur die Position bewertet, während in realer Umgebung noch die Bedienbarkeit hinzukam.

Die Fragestellung „Nutzbarkeit der Armauflage“ wurde in virtueller Umgebung tendenziell schlechter bewertet. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass der Arm nicht entlastet werden kann und die dann auftretenden Haltekräfte als unangenehm empfunden werden (Abbildung 25).

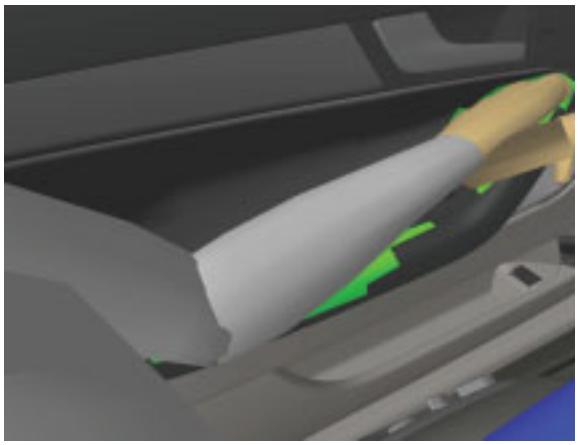


Abbildung 25: Bewertung „Nutzbarkeit der Armauflage“ im virtuellen Ergonomiemodell (links die Sicht der Versuchsperson in virtueller Umgebung, rechts das Verhalten der Versuchsperson in realer Umgebung).

Andererseits kann die korrekte Position durch die Versuchsperson nur schwer ermittelt werden, da die Anzeige der Kollisionserkennung durch den Arm verdeckt wird. Weiterhin ist durch das fehlende Stofffeld keine seitliche Begrenzung bzw. Führung für den Arm vorhanden.

Bei der „Erreichbarkeit Handschuhkastenöffner“ kann der Arm ebenfalls nicht entlastet werden, da ein Eingreifen in den Handschuhkastenöffner nicht möglich ist. In Kombination mit dem großen Abstand (Abbildung 26) zeigt sich, dass die zu bewertende Position nur mit großen Haltekräften zu erreichen ist. Dies spiegelt sich in der negativen Bewertung wieder.

Abbildung 26: Bewertung „Erreichbarkeit Handschuhkastenöffner“ im virtuellen Fahrzeugmodell (links die Sicht der Versuchsperson in virtueller Umgebung, rechts das Verhalten der Versuchsperson in realer Umgebung).

Nun bleibt noch zu klären, warum sich die oben identifizierten Punkte nicht auch auf die anderen Ergebnisse auswirken. Zur Bewertung „Erreichbarkeit Cupholder“ wurde in der virtuellen Umgebung ein realer, getrackter Cup samt Cupholder verwendet, sodass ein entsprechendes haptisches Feedback vorhanden war. Im Fall von „Fensterheber“ und „Klimabedienteil“ spielt die fehlende Entlastungsmöglichkeit keine große Rolle, da die Entfernungen nicht so groß sind, bzw. die Rückmeldung der Kollisionserkennung gut erkennbar war.

2.2.4 Diskussion

Zu den Sichtuntersuchungen lässt sich zusammenfassend sagen, dass sie in virtueller Umgebung großteils zu den gleichen Ergebnissen führen wie in realer Umgebung. Lediglich bei der Fragestellung „Kopffreiheit“, deren Beantwortung durch das geringere Field-of-View des HMD erschwert wird, haben sich Abweichungen ergeben.

Bei den Greifuntersuchungen fällt auf, dass gerade dort Abweichungen in der Bewertung auftreten, wo ein komplexes haptisches Feedback fehlt. Dieser Mangel ließe sich durch eine erweiterte Simulation von haptischem Feedback beheben, beispielsweise durch spezielle Datenhandschuhe. Ebenfalls hilfreich wäre der Einbau entsprechender Hardware.

Die am Markt befindlichen Systeme zur Simulation von haptischem Feedback erzeugen dieses meist über Vibrationen an den Finderkuppen, damit ist allerdings die Bewertung von Armauflagen ausgeschlossen. Bisher gibt es laut Schwanecke

(2004) auch noch keine brauchbaren Ansätze, wie eine haptische Schnittstelle gestaltet werden könnte.

Mit der Integration von Hardwarebauteilen als haptisches Feedback würde allerdings der Grundgedanke einer Virtuellen Sitzkiste in Frage gestellt. Der Sinn und Zweck ist es schließlich, Flächen nur virtuell zu visualisieren und somit auf teure und zeitaufwändige Hardwareherstellung zu verzichten.

Wie viel haptisches Feedback erforderlich ist, hängt letztendlich immer von der ergonomischen Fragestellung ab die betrachtet werden soll, und muss somit für jede Untersuchung neu bestimmt werden. Um eine umfassende Bewertung eines Fahrzeugkonzeptes in virtueller Umgebung zu ermöglichen, sollte der Weg beschritten werden, soviel haptisches Feedback zu erzeugen wie nötig, aber so wenig wie möglich. Ein realistisches Berührungsempfinden ist schließlich die Grundvorrausetzung für die Wahrnehmung von Gegenständen und Oberflächeneigenschaften (Loomis & Ledermann, 1986).

Weiterhin muss in jedem Fall beurteilt werden, welche Fragestellung die Versuchsperson wirklich bewertet. Das Beispiel „Erreichbarkeit Türinnenbetätigung“ zeigt, wie sich durch die Integration von haptischem Feedback durch Serienteile die Bewertungsgrundlage verändert. Hier wurde schließlich neben der Erreichbarkeit auch die Bedienung bewertet. Ohne die Versuchspersonen explizit auf diesen Unterschied hinzuweisen, kann offensichtlich nicht davon ausgegangen werden, dass eine Trennung der beiden Fragestellungen bei der Bewertung durch die Versuchspersonen erfolgt.

In Tabelle 6 ist nun zusammenfassend dargestellt, welche ergonomischen Fragestellungen virtuell beurteilt werden können.

Tabelle 6: Fragestellungen die in virtueller Umgebung beurteilt werden können.

Sichtuntersuchungen	Greifuntersuchungen
• Sicht auf das Kombiinstrument • Mitteldisplay Lage/ Sichtbarkeit • Klimabedienteil Auffindbarkeit • Sichtbeeinträchtigung durch Säulen • Raumgefühl	• Fensterheber Erreichbarkeit • Armauflage Tür Nutzbarkeit • Cupholder Erreichbarkeit • Klimabedienteil Erreichbarkeit

2.3 Zusammenfassung

Im Großen und Ganzen sagen die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen, „Vergleich der Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischen Wahrnehmung“ und „Vergleich der Bewertung eines Fahrzeugmodells in virtueller und in realer Umgebung“ aus, dass die Wahrnehmung in virtueller und in realer Umgebung gleich ist.

Aus der Ermittlung der Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung kann abgeleitet werden, dass die visuelle Wahrnehmung in virtueller Umgebung keiner bedeutenden Einschränkung unterliegt. Wäre dies der Fall, müsste die Wahrnehmungsschwelle in virtueller Umgebung höher sein. Als Störgröße wurde hier lediglich der Datenhandschuh ermittelt, der die Wahrnehmung der rotatorischen Divergenz erschwert.

Der Vergleich der Bewertung eines Fahrzeugmodells in realer und in virtueller Umgebung zeigt, dass die Visualisierungsqualität in virtueller Wahrnehmung ausreicht, um den Verlauf von Flächen und Formen richtig zu erkennen. Ebenso ist es möglich, die ergonomischen Eigenschaften des virtuellen Fahrzeugmodells korrekt zu beurteilen. Lediglich bei ergonomischen Fragestellungen, deren Beantwortung ein großes Field-of-View oder ein komplexes haptisches Feedback erfordert, kann es bei der Beurteilung in virtueller Umgebung zu Abweichungen kommen.

Neben den objektiven Wahrnehmungsschwellen wurden mit mehreren Fragebögen viele subjektive und individuelle Parameter der Versuchspersonen erhoben (vgl.

Kapitel 2.1.1.2). Die ausführlichen Ergebnisse dazu sind in Anhang A-2 zu finden. Die Ergebnisse lassen sich hier zu einer Aussage zusammenfassen. Es konnte kein signifikanter Einfluss eines Parameters auf die Wahrnehmungsschwellen in virtueller Umgebung identifiziert werden. Dies gilt insbesondere für die Cybersickness, die nur sehr selten auftrat. Das bestätigt in sofern die bisherigen Ergebnisse, als dass die virtuelle Umgebung auch hier keinen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung zeigt. Ein weiteres Indiz für die Qualität der virtuellen Umgebung ist die Bewertung des Präsenzempfindens mit 2,68 nach der Schulnotenskala (Standardabweichung 0,53).

3 KONZEPTION EINES ERGONOMISCH OPTIMIERTEN HEAD-MOUNTED DISPLAYS

In den folgenden Kapiteln wird die Konzeption eines ergonomisch optimierten Head-Mounted Displays beschrieben. Nach der Definition und Sammlung der ergonomischen Anforderungen wird deren technische Umsetzbarkeit beurteilt. Anschließend werden verschiedene Ansätze vorgestellt, wie das HMD konzipiert werden könnte. Zum Schluss wird das ausgewählte Konzept vorgestellt und bewertet.

Wie die bisher durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben (vgl. Kapitel 2), ist es mit aktuellen VR-Systemen möglich, in virtueller Umgebung ergonomische Fragestellungen zu bewerten. Die schnelle Weiterentwicklung von Prozessoren und Grafikkarten wird in naher Zukunft dafür sorgen, dass sich die Visualisierungsqualität weiter verbessert. Einerseits wird die Oberflächenqualität durch Texturen und Shader realistischer, anderseits wird sich die Performance der VR-Systeme erhöhen, sodass die Bildwiederholrate ansteigt. Diese Weiterentwicklungen werden zu einer Verbesserung von Immersion und Realitätsnähe führen. Da also an der Weiterentwicklung der Bildberechung schon gearbeitet wird, kann hier ein Blick auf die anderen Systemkomponenten geworfen werden.

Während der durchgeführten Versuche wurde festgestellt, dass insbesondere das HMD noch nicht ausgereift ist. Beispielsweise wurde die Bildqualität hinsichtlich Auflösung und Schärfe bemängelt, auch der vorhandene Tragediskomfort und die lauten Lüftergeräusche wurden beanstandet. Im Rahmen der Versuchsreihe wurden auch Fragen zur Belastung der Versuchspersonen durch den Versuchsaufbau gestellt (vgl. Kapitel 2.1.1.2). In Abbildung 27 sind die Ergebnisse zu Tragediskomfort und Bildschärfe des SESOS HMD 120/40 abgebildet.

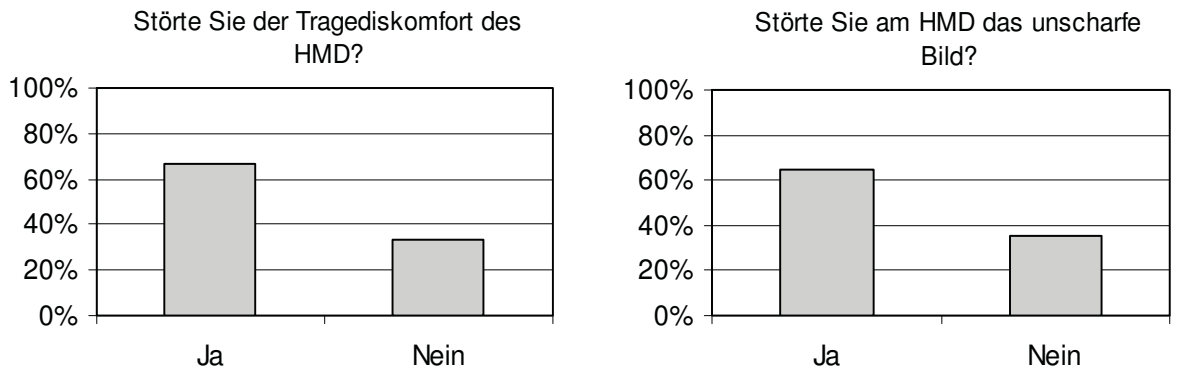


Abbildung 27: Ergebnisse der Befragung der Versuchspersonen zu störenden Faktoren innerhalb des VR-Systems.

Wie aus Abbildung 27 hervorgeht, bemängeln 67% der Versuchspersonen den Tragediskomfort des HMD und 65% das unscharfe Bild. Diese genannten Punkte sind zwei von vielen, die beachtet werden müssen, um ein ergonomisch optimales Produkt zu erhalten.

Die Basis für dieses Konzept bilden dabei die ergonomischen Anforderungen an Visualisierungsqualität und Tragediskomfort. Bei der Bewertung und Auswahl der technischen Komponenten soll nicht auf visionäre Zukunftstechnologien eingegangen werden, sondern nur auf die technischen Möglichkeiten, die bereits jetzt, oder in den nächsten zwei bis drei Jahren umsetzbar sein werden.

Um ein möglichst großes Einsatzspektrum abzudecken, wurden für die Konzepterstellung keine Anwendungsfelder definiert, sondern lediglich die ergonomischen Anforderungen als Basis herangezogen. Deshalb gehören zu dem hier erarbeiteten Konzept nur Bilderzeugung und Tragegestell.

Die Bilderzeugung beinhaltet alles, was zur Bildentstehung benötigt wird, insbesondere das Display, und je nach Konzept Lichtquellen und verschiedene Optiken. Hier soll die Bilderzeugung aber als eine Komponente behandelt werden, denn aus ergonomischen Gesichtspunkten kann die Art der Bildentstehung vernachlässigt werden, solange das Bild die gewünschten Spezifikationen aufweist. Etwaige vorgelagerte Hard- oder Software wird nicht mit einbezogen. Da die Entwicklungsgeschwindigkeit in diesen Bereichen sehr hoch ist, kann die zukünftige Entwicklung auch kaum abgeschätzt werden.

Das Tragegestell bildet die Schnittstelle zwischen Bilderzeugung und Kopf und muss die auftretenden Kräfte optimal an den Anwender weitergeben.

Zum besseren Verständnis erfolgt an dieser Stelle die Erläuterung des Begriffes HMD. Letztendlich sind alle kopfgestützten Systeme, in denen ein Display verbaut ist, als HMD´s zu bezeichnen. Hier sollen aber einige Abgrenzungen vorgenommen werden. Aus der Anwendung in einer Virtuellen Sitzkiste ergibt sich, dass kein see-through (Durchsicht) -HMD verwendet werden kann, wie es im Bereich der Augmented-Reality eingesetzt wird. Monokulare Systeme eignen sich ebenfalls nicht für immersive Anwendungen. Im Entertainmentbereich gibt es einige HMD´s, die auch als Videobrillen bezeichnet werden und hauptsächlich dazu dienen, um auf Reisen Video bzw. TV zu schauen. Diese HMD´s zeichnen sich zwar durch ein geringes Gewicht von weniger als 200 g aus, bieten aber nur eine Auflösung von 800 x 600 Pixel oder weniger und verfügen über ein sehr kleines Field-of-View.

Hier soll es sich jedoch um ein HMD handeln, dass für VR-Anwendungen geeignet ist und deshalb ein großes Field-of-View und eine hohe Auflösung zur Verfügung stellt. Ein großes Field-of-View ist bei der Bewertung von Innenräumen unerlässlich, ebenso ist es eine Grundvoraussetzung für die Bewertung eines Fahrzeugkonzeptes in einer Fahrsimulation, beispielsweise beim Rückwärtseinparken. Eine hohe Auflösung ist nötig, damit die Oberflächenstruktur und so der Verlauf von Flächen gut erkannt werden können. Weiterhin müssen Displays und kleine Symbole noch gut ablesbar sein.

Wie groß der Bedarf für ein solches HMD ist, zeigt ein Überblick über den Markt. Hier wird ersichtlich, dass noch niemand ein HMD entwickelt hat, welches eine ausreichende Visualisierungsqualität liefert (vgl. Bimber, 2002). Es gibt zwar einige vielversprechende Ansätze (vgl. Haves & Blackham, 2004; Kohlhass & Schmidt-Tjarken, 1997), allerdings mussten in der Vergangenheit immer Kompromisse bei der technischen Umsetzung gemacht werden.

Als vor einigen Jahren der erste VR-Boom zu Ende ging, verschwanden viele HMDs wieder vom Markt. Die schnelle Weiterentwicklung von Großbildschirmen und Beamern hat vielfach HMD basierte VR-Anwendungen ersetzen bzw. verdrängen können. Ebenso haben sich die industriellen VR-Anwendungen noch nicht richtig durchsetzen können, da teilweise die Akzeptanz fehlte, bzw. die Rahmen-bedingungen für einen produktiven Einsatz noch nicht vorhanden waren (vgl. Symietz, Ostermann & Zimmermann, 2001).

Des Weiteren sind in den letzten Jahren kaum Neuentwicklungen auf dem Markt erschienen. Hauptgrund dafür ist der sehr kleine Markt, der nur aus OEMs der Luftfahrt- und Automobilindustrie, Hochschulen, Forschungsinstitutionen und dem Militär besteht. Somit können die Hersteller nur sehr kleine Stückzahlen absetzen. Dies führt dazu, dass sich nur wenige Firmen auf diesen Markt wagen. Entweder werden sie dabei vom Militär unterstützt, wie beispielsweise die Firma nVis, oder sie haben wie Zeiss ihr Kerngeschäft in anderen Bereichen und hoffen, in diese Marktnische vordringen zu können.

Wenn es hier auch nicht möglich ist, auf die äußeren Faktoren Einfluss zu nehmen, so kann ein ergonomisch optimales Konzept doch die Grundlage für zukünftige Produkte bilden und somit die Qualität des HMDs an sich erhöhen. Dabei sind folgende Anforderungen zu berücksichtigen:

- Ein möglichst geringes Gewicht und eine gleichmäßige Gewichtsverteilung.
- Ausreichende Stabilität, auch für Probandenversuche.
- Eine gute Bildqualität.
- Ein großes Field-of-View, das dem des Menschen entspricht.
- Umfangreiche Einstellungsmöglichkeiten.
- Ein ansprechendes Erscheinungsbild.

Der Zielkonflikt besteht in erster Linie darin, die ergonomischen Anforderungen in einem Produkt zusammenzufassen, ohne dass sich Gewicht und Gewichtsverteilung negativ auf den Anwender auswirken. Ziel ist es, alle Anforderungen zu berücksichtigen und ein Konzept für ein HMD zu erarbeiten, das für den Anwender maximale Immersion bei minimaler Belastung bietet.

In diesem Kapitel soll für jeden Punkt ein Lösungsansatz vorgestellt und das aktuell technisch Machbare definiert werden.

3.1 Definition der ergonomischen Anforderungen und Auswahl der Komponenten

Grundsätzlich lassen sich die ergonomischen Anforderungen in zwei Bereiche aufteilen. Für die Wahrnehmung der virtuellen Umgebung ist in erster Linie die Leistungsfähigkeit des Auges von Bedeutung. Daraus lassen sich die Parameter der Bilderzeugung und ihrer einzelnen Komponenten wie Display und Lichtquelle ableiten. Damit die Bilderzeugung über das Tragegestell am Kopf befestigt werden kann, müssen hauptsächlich anthropometrische Anforderungen berücksichtigt werden.

3.1.1 Allgemeine Betrachtungen zu Konzept und Design

Ein großer Nachteil der HMD´s, die innerhalb von VR-Systemen verwendet werden, ist das hohe Gewicht. Fast alle Geräte wiegen mehr als ein Kilogramm, teilweise liegt das Gewicht erheblich darüber. Die negativen Auswirkungen des hohen Gewichts können durch eine ungünstige Gewichtsverteilung noch erheblich verstärkt werden. Neben der so entstehenden statischen Belastung des Anwenders wird zusätzlich durch das Gewicht noch eine Trägheit erzeugt, die bei jeder Bewegung überwunden werden muss. Um diesen Problemen entgegen zu wirken, werden folgende Anforderungen definiert:

- So wenig Gewicht wie möglich.
- Symmetrische Gewichtsverteilung des HMDs bezogen auf Längs- und Querachse.
- Schwerpunkt bzgl. Hochachse auf Höhe des oberen Kopfgelenkes (Ende der Wirbelsäule).
- Sämtliche Teile müssen am Kopf positioniert werden. Dabei sind die anthropometrischen Maße und die Variation der Kopfformen zu berücksichtigen.
- Alle Bauteile, die Kontakt mit dem Körper des Anwenders bekommen können, müssen entsprechend gepolstert sein.

Die Definition eines idealen Punktes auf der Hochachse ist nicht trivial. Im Gegensatz zu den Kopfgelenken kann der Wirbelsäule, als einer Kombination aus mehreren

Wirbelgelenken, kein exakter Drehpunkt zugewiesen werden. Damit der Anwender so wenig wie nötig belastet wird, sollte der Schwerpunkt auf der Höhe des oberen Kopfgelenkes liegen. So entsteht bei einer Nickbewegung kein zusätzliches Drehmoment.

Obwohl in den meisten Fällen die Abdeckung der anthropometrischen Maße, sowie der unterschiedlichen Kopf- und Gesichtsformen durch entsprechende Einstellmöglichkeiten erfolgen kann, gibt es Bereiche in denen dies nicht funktioniert. Bei der Positionierung von Bauteilen im Bereich der Nase müssen beispielsweise aufgrund der Variationsbreite der Nasenform entsprechende Abstände berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass statistisch ermittelt Durchschnittswerte nicht immer verwendet werden können, stattdessen muss eine Grenzkontur definiert werden.

Um die Akzeptanz des HMDs als Visualisierungsmedium zu fördern, sollte ein ansprechendes Design gewählt werden. Nicht jede Versuchsperson ist begeistert, ihren Kopf in einen schwarzen Kasten zu stecken. Auch eine klassische Helmlösung ist aufgrund der unterschiedlichen Kopfgrößen nicht zu empfehlen. Kohlhass & Schmidt-Tjarken (1997) haben in ihrer Arbeit mehrere vielversprechende Ideen für ein zweckmäßiges Design entwickelt (s. Abbildung 28).

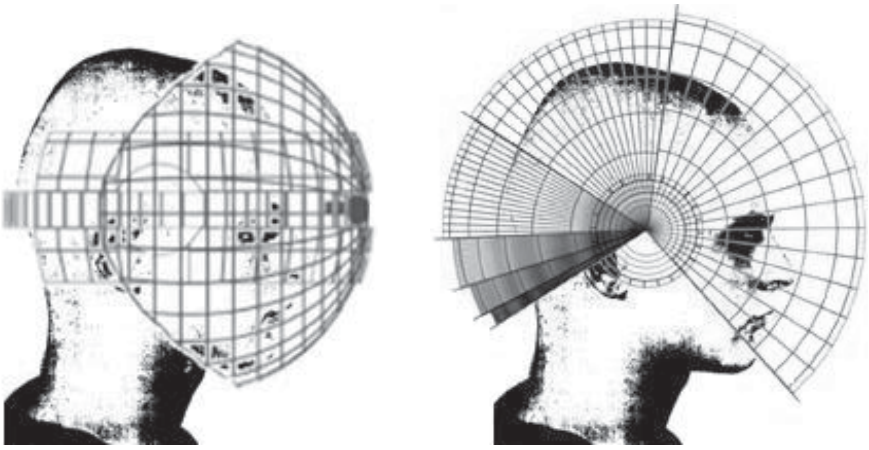


Abbildung 28: Gestalterische Ansätze für ein HMD mit großem Field-of-View (Kohlhass & Schmidt-Tjarken, 1997).

Bei beiden Ansätzen wird eine Schale dargestellt, die das gesamte Blickfeld abdeckt. Allerdings ist es fraglich, ob wirklich das gesamte Gesicht umschlossen werden muss. Grundsätzlich sollten die Atemwege frei sein, damit der Anwender genug Luft bekommt. Um zu verhindern, dass ausgeatmete Luft die Optik beschlägt, sollte hier eine Trennung erfolgen.

Auch wenn es vorteilhaft ist, ein ansprechendes Design zu wählen, kann bei der Gestaltung des HMDs die Gewichtskomponente nicht vernachlässigt werden. Deshalb sollten keine funktionslosen Designelemente verwendet, sondern das Design in erster Linie durch die farbliche Gestaltung positiv beeinflusst werden. Ziel des Designs sollte es einerseits sein, die Funktion des HMDs als innovatives Visualisierungsmedium wiederzuspiegeln und andererseits keine Abneigung zu erzeugen. Weiterhin kann durch eine farbliche Absetzung der Verstellelemente die Auffindbarkeit der Elemente erleichtert werden.

Da für die Arbeit mit der Virtuellen Sitzkiste die Kommunikation zwischen Anwender und außenstehenden Personen unerlässlich ist, sollten die Ohren möglichst nicht durch das HMD verdeckt werden.

3.1.2 Bildeigenschaften

Die Hauptaufgabe eines HMD ist die Visualisierung der virtuellen Umgebung, deshalb liegt hier der Focus auf der visuellen Wahrnehmung und den daraus resultierenden Anforderungen.

Der Mensch nimmt ca. 87% (2×10^8 Bit/s) seiner Informationen über die Augen auf (HdE, 1989). Dies unterstreicht einerseits die wichtige Rolle des HMDs als Visualisierungsmedium innerhalb des VR-Systems, anderseits wird deutlich, was für ein leistungsfähiges Sinnesorgan das menschliche Auge (s. Abbildung 29) ist und welche hohen Anforderungen an Bildqualität erfüllt werden müssen.

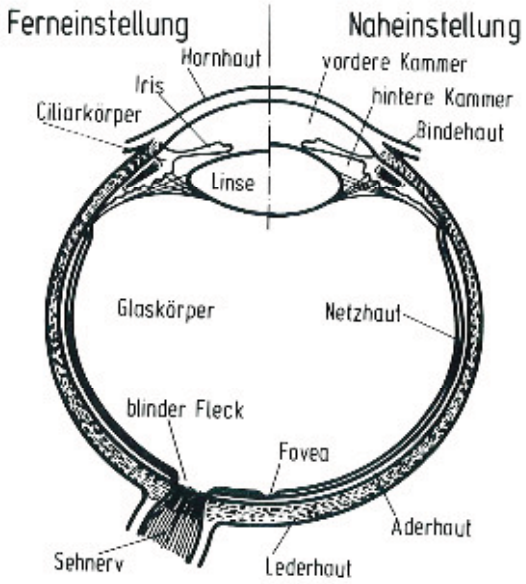


Abbildung 29: Schnitt durch das menschliche Auge (HdE, 1989).

Das Auge ist so leistungsfähig, dass sein Wahrnehmungsspektrum wesentlich größer ist, als der Bereich den moderne Displays abdecken können. Deshalb ist es zweckmäßig, einige Parameter festzulegen, auf deren Basis die Anforderungen für die Bilderzeugung definiert werden können. In Tabelle 7 sind diese Parameter aufgelistet.

Tabelle 7: Anforderungen an die Bilderzeugung.

Ergonomische Parameter für die visuelle Wahrnehmung laut Handbuch der Ergonomie (1989)	
Farbraum (Tagsehen)	380 bis 790 Nanometer
Leuchtdichte	10^{-6} bis 10^{5} cd/m^2, optimal 200 – 2000 cd/m^2
Auflösung	Eine Bogenminute
Bildwiederholrate	> 80 Hz

Um das Bild flimmerfrei darstellen zu können, ist eine Bildwiederholrate (Latenzzeit) von 80 Hz erforderlich. Damit die visuelle Wahrnehmung nicht durch das Pixelraster des Displays gestört wird, sollte mindestens eine Displayauflösung von einem Pixel pro Bogenminute erreicht werden. Wie viele Pixel das Display dafür zur Verfügung stellen muss, hängt davon ab, wie Displayauflösung und Field-of-View zusammenpassen. Legt man beispielsweise eine gängige Auflösung von 1024 Pixel

zugrunde, kann ein Field-of-View von 17,1° zur Verfügung gestellt werden. Dieses Field-of-View ist aber keineswegs ausreichend für die Anwendung in virtuellen Umgebungen.

Da aber bisher kein HMD das gesamte menschliche Field-of-View abdecken konnte, wurden die Auswirkungen dieser Reduzierung auf die Wahrnehmung vielfach untersucht (vgl. Arthur, 2000; Schulte-Pelkum, Riecke, von der Heyde & Bülthoff, 2002). Für die meisten Anwendungen innerhalb eines VR-Systems führte eine Einschränkung des Field-of-View zu einer Beeinträchtigung der Wahrnehmung. Arthur (2000) stellte beispielsweise Leistungsverluste beim Durchführen von Suchaufgaben fest.

Als Grundlage für die Definition des Field-of-View wird hier das maximale Blick-Gesichtsfeld für Hellreize herangezogen. Es beschreibt den Bereich der Punkte, die bei ruhendem Kopf und bewegtem Auge gesehen werden können (HdE, 1989) und entspricht somit dem Anwendungsfeld eines HMD. In Abbildung 30 ist das maximale Blick-Gesichtsfeld für Hellreize dargestellt.

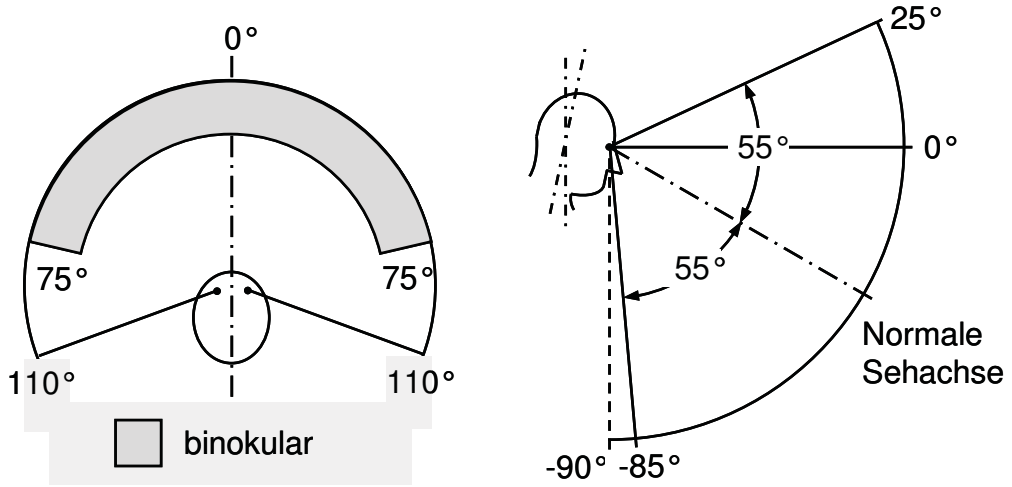


Abbildung 30: Maximales Blick-Gesichtsfeld für Hellreize (links horizontal, rechts vertikal) nach HdE (1989).

Um einen Stereoeindruck in der virtuellen Umgebung zu erzeugen, wird für jedes Auge ein eigenes Bild berechnet. Deshalb muss im Falle des horizontalen Blickfeldes der binokulare Teil für jedes Auge komplett dargestellt werden. Somit sollte das HMD also pro Auge 185° abdecken können. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass es sich dabei um Idealwerte handelt, die individuell abweichen können.

Weiterhin gilt es, gewisse Anforderungen an die Bildqualität zu berücksichtigen. Diese mögen im ersten Augenblick als selbstverständlich erscheinen, dennoch hat die Vergangenheit gezeigt, dass bei der Gestaltung von HMDs aufgrund der fehlenden technischen Möglichkeiten immer Kompromisse eingegangen wurden.

Um ein qualitativ hochwertiges Bild zu erhalten, sollten folgende Parameter beachtet werden:

- Qualität des Stereoeindrucks.
- Gleichmäßige Helligkeit des Bildes.
- Qualität des Bildes im Randbereich.
- Gleichmäßige Schärfe des Bildes.
- Gleichmäßige Farbwiedergabe des Displays.
- Spiegelfreie Optik.
- Störungsfreie Überlappung der beiden Bilder.

Um nun das maximale Blick-Gesichtsfeld abdecken zu können, muss der gesamte Bereich vor dem Auge mit einem Bild bedeckt werden. Dabei ergibt sich bei einer hundertprozentigen horizontalen Überlappung ein Field-of-View von 185°. Wird das maximale Auflösungsvermögen des Auges von einer Bogenminute zugrunde gelegt, erfordert dies eine Auflösung von 11100 Pixeln. Als vertikale Auflösung ergibt sich aus dem Field-of-View von 110° eine Auflösung von 6600 Pixeln. Benötigt wird also ein Display mit der Auflösung von 11100 x 6600 Pixeln, was einem Seitenverhältnis von 1,682 : 1 entspricht. Ein Display mit einer so großen Auflösung ist zurzeit am Markt nicht verfügbar, das Seitenverhältnis entspricht allerdings nahezu dem gängigen Format 16 : 10.

3.1.3 Microdisplay

Um der Forderung nach geringem Gewicht und Bauraum zu folgen, kommen hier nur Microdisplays in Frage. Diese Displays zeichnen sich durch eine geringe Baugröße bei einer hohen Auflösung aus. Bei der Auswahl des Displays kann zwischen zwei unterschiedlichen Technologien gewählt werden, dem OLED- Display (Organic Light-Emmitting Diode) und dem LCoS- Display (Liquid Crystal on Silicon). Beide Displayarten haben konstruktionsbedingt gewisse Vor- und Nachteile, wichtig ist hier

aber lediglich der Hauptunterschied zwischen den beiden Displaytypen. Während das OLED selbst ausreichend Licht aussenden kann, muss das LCoS von einer Lichtquelle beleuchtet werden. Dies wirkt sich negativ auf das Gewicht aus, bietet aber den Vorteil einer sehr guten Ausleuchtung. Eine Empfehlung welches Display sich besser für die Anwendung in einem HMD eignet, kann aus zweierlei Gründen an dieser Stelle nicht gegeben werden. Momentan lassen sich beide Displayarten noch nicht mit der benötigten Auflösung herstellen. Wann dies der Fall ist, und welche Technologie sich durchsetzen wird, kann nur schwer vorausgesagt werden. Ebenfalls ist nicht abzusehen, wie sich die Weiterentwicklung auf die spezifischen Vor- und Nachteile auswirken wird.

Da aber die Entwicklung der Microdisplays stetig voranschreitet, ist es nur noch eine Frage der Zeit, bis ein Display mit einer ausreichenden Auflösung verfügbar ist. Deshalb wird für dieses Konzept im Gegensatz zu anderen Ansätzen kein Kompromiss hinsichtlich des Field-of-View eingegangen, sondern bezüglich der Auflösung pro Pixel. Dadurch kann das Konzept beibehalten werden und wenn in Zukunft Displays mit der geforderten Auflösung zur Verfügung stehen, müssen sie nur integriert werden.

Momentan ist das Microdisplay mit der höchsten Auflösung am Markt das „Sony 4K SXRD“ (Abbildung 31) mit einer Auflösung von 4096 x 2160 Pixel. Der Begriff 4K bedeutet dabei vierfache HDTV Auflösung, SXRD steht für „Silicon X-tal Reflective Display“ und ist die Bezeichnung von Sony für ein LCoS-Display (Sony, 2007). Verbaut wird dieses Display in erster Linie in Projektoren bzw. Beamern.

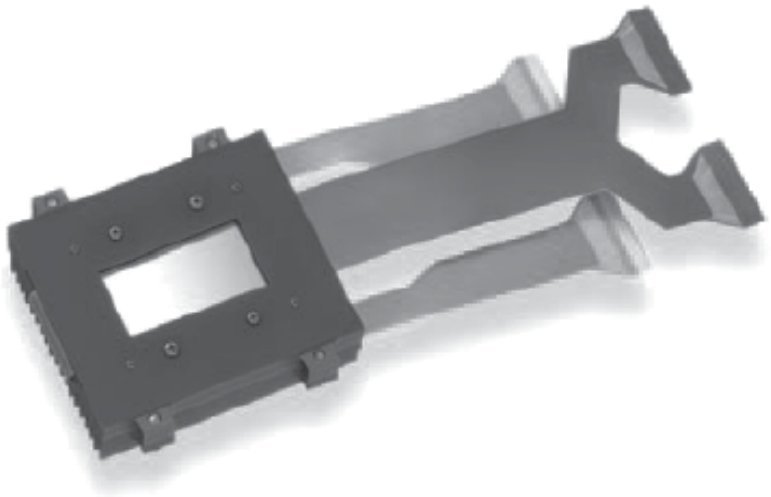


Abbildung 31: Sony 4K Display, Maßstab ca. 1:2 (Sony, 2007).

Legt man den definierten Field-of-View von 185° x 110° und eine horizontale Anordnung des Displays zugrunde, ergibt sich eine horizontale Auflösung von 2,71 Bogenminuten pro Pixel und ein vertikal Auflösung von 3,06 Bogenminuten pro Pixel. Damit liegt die Auflösung pro Pixel im Bereich heutiger Systeme (vgl. Staebler, 2007), obwohl ein wesentlich größeres Field-of-View zur Verfügung gestellt wird. Wenn in Zukunft Displays mit größerer Auflösung erhältlich sind, kann auch die Auflösung pro Pixel verbessert werden.

Eine Betrachtung der Bildformate zeigt einen Unterschied zwischen der Anforderung von 1,682 : 1 (185° x 110°) und dem wirklichen Format des Displays von 1,896 : 1. Das Bild des Displays ist also etwas breiter als gefordert, bei einer entsprechenden Anpassung der Breite würde sich auch die Höhe reduzieren und dann nicht mehr den Anforderungen entsprechen.

Die softwareseitige Anpassung des Seitenverhältnisses ist in diesem Fall nicht zielführend. Wenn die Software nicht mit derselben Auflösung arbeitet wie das Display, wird das Bild auf die entsprechende Pixelzahl skaliert, bzw. die Pixel werden aufgeteilt. Dies führt dann aber zu einer Verschlechterung der Bildqualität. Also bleibt doch nur die Möglichkeit, das Bild an die geforderte Breite anzupassen. Dadurch wird dann das vertikale Field-of-View auf 97,56° reduziert. Diese Reduzierung hat allerdings auch einen positiven Effekt, die vertikale Auflösung steigt auf 2,71 Bogenminuten pro Pixel.

Da es sich um ein LCoS-Display handelt, wird eine zusätzliche Lichtquelle benötigt, die das Display beleuchtet. Auch hier sind innovative und gewichtsparende Lösungen erhältlich. Im Gegensatz zu der bisherigen Lichterzeugung mit Glühlampen benötigen LED´s weniger Leistung und haben einen höheren Wirkungsgrad. Deshalb kann auch auf eine Kühlung durch Lüfter verzichtet werden, dies reduziert das Gewicht und die Lärmemissionen entfallen. Weiterhin verfügen LEDs über eine längere Lebensdauer und sind unempfindlicher gegenüber Erschütterungen.

3.1.4 Tragegestell

Da die Bildvisualisierung die Hauptaufgabe des HMD´s ist, kommt dem Tragegestell auf den ersten Blick nur eine nachgelagerte Funktion zu. Dennoch ergeben sich auch hier eine Vielzahl von Anforderungen. Neben einer stabilen Befestigung der Bilderzeugung müssen die auftretenden Kräfte möglichst gleichmäßig verteilt werden. Weiterhin müssen bei der Gestaltung folgende Punkte beachtet werden:

- Ausreichende Stabilität für Probandenversuche.
- Ein hochwertiges Erscheinungsbild.
- Die Bilderzeugung muss ausreichend vor Einflüssen von außen geschützt werden.
- Anlageflächen:
  - Ausreichende Dimensionierung, damit eine geringe Oberflächenbelastung entsteht.
  - Positionierung der Polster in muskelfreien Bereichen.
  - Weiche, luftdurchlässige Polster, um Schweißbildung zu reduzieren.
- Fester Sitz, da ein Verrutschen die Visualisierungsqualität beeinflussen kann.
- Keine Beeinträchtigung der akustischen Wahrnehmung durch Bauteile vor dem Ohr oder durch Lüftergeräusche.
- Intuitives Einstellen von:
  - Kopfdurchmesser.
  - Augenabstand.
  - Abstand Auge zu Display.
- Wenn nicht genug Freiraum für eine Brille vorgesehen werden kann, muss eine Anpassung der Bildschärfe möglich sein.
- Verlauf der Kabel im Inneren.

Bevor mit der detaillierten Generierung von Konzeptideen begonnen wird, müssen erst einige grobe Gestaltungsvorgaben definiert werden. Laut Luczak, Schmidt & Koller (2004) liegt das maximale Gewicht für eine Brille bei 70 g. Dieses Gewicht und

auch der Zielwert für HMDs mit Kopfriemen von ca. 200 g, wie beispielsweise bei Videobrillen, dürfte bei diesem Konzept überschritten werden. Somit muss ein starres Tragegestell verwendet werden, welches über Riemen und Polster am Kopf befestigt wird.

Aufgrund der unterschiedlichen Kopfmaße sind entsprechende Verstellmöglichkeiten unverzichtbar. In Tabelle 8 sind die wichtigsten Maße, sowie die sich daraus resultierenden Empfehlungen aufgelistet.

*Tabelle 8: Maße für das Tragegestell und empfohlene Verstellmöglichkeiten mit Wertebereichen (nach DIN 33402b (2005), die mit * gekennzeichneten Werte sind dem Handbuch der Ergonomie (1989) entnommen).*

Maß	Werte in mm, nach Perzentil		Empfohlener Wertebereich	
	5.	95.	min.	max.
Pupillenabstand männlich	58	67	50	67
Pupillenabstand weiblich	50	65		
Augen-Scheitelhöhe m. *	110	133	108	133
Augen-Scheitelhöhe w. *	108	127		
Kopflänge m.	182	205		
Kopflänge w.	165	194		
Größte Kopfbreite m.	146	167		
Größte Kopfbreite w.	138	159		
Sagittaler Kopfbogen m.	312	377		
Sagittaler Kopfbogen w.	301	359		
Horizontalumfang d. Kopfes m.	548	599	520	599
Horizontalumfang d. Kopfes w.	520	572		

Obwohl mehrere Maße bei der Gestaltung des Tragegestells zu berücksichtigen sind, sollten drei Verstellmöglichkeiten ausreichen. Um einen festen Sitz auf dem Kopf sicherstellen zu können, muss der Kopfumfang (Horizontalumfang des Kopfes) entsprechend einstellbar sein. Dem Pupillenabstand und der Augen-Scheitelhöhe kommen hier eine besondere Bedeutung zu. Durch das Verstellen dieser beiden

Parameter kann der Anwender später die Optik vor seinen Augen positionieren. Können diese Einstellungen nicht exakt genug vorgenommen werden, kann die Visualisierungsqualität erheblich darunter leiden.

Neben den harten Fakten, aus denen sich die ergonomischen Vorgaben ableiten, müssen auch Eigenschaften des HMD´s definiert werden, die sich nicht einfach in Zahlen fassen lassen. Dies betrifft insbesondere den Bereich der Usability, der sich hier in erster Linie auf die Verstellmöglichkeiten bezieht.

Um eine intuitive Bedienung der Verstellmöglichkeiten zu ermöglichen, sollten folgende Faktoren angemessen berücksichtigt werden:

- Erwartungskonformität in Bezug auf Position von Bedienelement und Betätigungsrichtung.
- Bedienbarkeit in Bezug auf Verstellkraft und -weg.
- Ergonomisch geformte Bedienelemente.

Weiterhin muss sichergestellt werden, dass sich die eingestellten Positionen nicht verändern, bzw. dass das HMD nicht verrutschen kann.

Nachdem nun die Einstellmöglichkeiten erläutert worden sind, müssen noch einige Punkte zu den Riemen und Polstern bedacht werden, mit denen das HMD letztendlich auf dem Kopf befestigt werden soll. Das Hauptgewicht des HMDs sollte von einem Polster getragen werden, dass in Verlängerung der Wirbelsäule positioniert ist, so wird dem Auftreten von Drehmomenten vorgebeugt. Das zweitwichtigste Polster muss am Hinterkopf sitzen, denn dort wird das Drehmoment aufgenommen, dass durch das Gewicht der Bilderzeugung entsteht. Ein weiteres Polster muss an der Stirn liegen, um seinerseits einen Gegenpol zum Polster am Hinterkopf zu bilden. In dieser Lage kann es einen Teil des Gewichts von Bilderzeugung und Spiegel aufnehmen. Damit das HMD nicht verrutschen kann, sollte noch je ein Polster links und rechts am Kopf angebracht sein, um so den Zug auf den Riemen für den Kopfumfang abzufangen. Insgesamt werden also fünf Polster benötigt.

Kohlhass & Schmidt-Tjarken (1997) haben in ihrer Arbeit ein Gestell entwickelt, bei dem die Arterienverläufe am Kopf berücksichtigt werden. Dies soll verhindern, dass es bei langen Anwendungen zu Störungen in der Blutzufuhr kommt. Dieser Ansatz ist

sinnvoll, und soll an dieser Stelle übernommen werden. In Abbildung 32 ist der Arterienverlauf am menschlichen Kopf dargestellt.

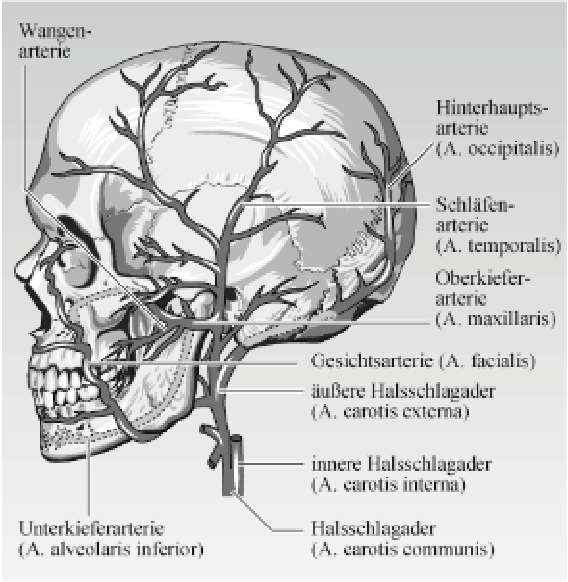


Abbildung 32: Arterienverlauf am menschlichen Kopf (Medeco, 2007).

Insbesondere der Aderverlauf der Arterie an der Schläfe sollte bei der Positionierung der Polster berücksichtigt werden. Die Arterie liegt so dicht unter der Haut, dass sie mit der Hand ertastet werden kann. Dennoch muss hinterfragt werden, ob dieses Konzept auch bei allen Kopfumfängen bzw. Kopfformen die gewünschte Wirkung zeigt. Im Allgemeinen sollten die Polster großflächig gestaltet werden, um eine möglichst geringe Flächenbelastung zu erzeugen. Weiterhin müssen geeignete Materialien ausgewählt werden, sodass es zu keiner Schweißbildung kommen kann.

Dabei muss ebenfalls auf die Durchlüftung geachtet werden. Neben der Wärme, die der Kopf an sich abstrahlt, wird durch Lichtquelle und Display weitere Wärme erzeugt. Deshalb muss diese Wärme mit der allgemeinen Luftzirkulation entweichen können, damit der Anwender nicht thermisch belastet wird. Ebenfalls sollte die Einleitung der Wärme von Lichtquelle und Display in das Tragegestell vermieden werden.

Ein weiterer Punkt ist die Lage der benötigten Kabel. Sie sollten so positioniert werden, dass sie beim Einstellen der Verstellmöglichkeiten nicht stören oder gar abgerissen werden können. Ebenso dürfen sie sich nicht in den Haaren verfangen. Aus diesen Gründen ist eine Verlegung im HMD vorzuziehen, auch wenn dadurch das Gewicht minimal ansteigt.

Insgesamt sollten drei Verstellmöglichkeiten vorgesehen werden, für Kopfumfang, Augen-Scheitelhöhe und Pupillenabstand. Die Verstellung für den Kopfumfang sollte hinten am Hinterkopf angebracht sein und für die Augenscheitelhöhe sollte die Verstellung oben auf dem Kopf in Verlängerung der Achse der Wirbelsäule positioniert werden. Für die Einstellung des Augenabstands bietet sich eine Position oberhalb der Nase zwischen den Augen an. Diese drei Positionen haben den Vorteil, dass sie alle einfach zu finden und leicht zu erreichen sind. Als Bedienelemente sollten geriffelte Drehelemente verwendet werden, die mit Raststufen versehen sind. So wird eine einfache und reproduzierbare Einstellung ermöglicht. Bei den Modellen Nvisor SX und SEOS 120/40 haben sie sich als zweckmäßig erwiesen. Weiterhin ermöglichen die Drehelemente eine Einhandbedienung, sodass der Anwender mit der anderen Hand das HMD fixieren kann.

Ein weiteres Problem bei den heutigen HMDs sind die auftretenden Zugkräfte durch das Anschlusskabel. Auch wenn die Verlegung des Kabels nicht direkt zum HMD und damit zur Themenstellung dieser Arbeit gehört, muss dennoch eine geeignete Schnittstelle definiert werden. Die statische Dauerbelastung durch einwirkende Zugkräfte auf den Kopf ist für den Anwender sehr unangenehm, auch wird er dadurch in seinen Bewegungen eingeschränkt bzw. verlangsamt. Der klassische Ansatz, die Kabel aus dem HMD am Hinterkopf herauszuführen ist nicht optimal, da bei einer Drehbewegung des Kopfes immer Drehmomente auftreten. Sinnvoller wäre ein Kabelabgang nach oben in der Verlängerung der Hochachse.

Dies würde aber zu einer örtlichen Überschneidung mit der Verstellung für die Augen-Scheitelhöhe führen. Die Hauptlast des HMDs wird durch ein Polster aufgenommen, das in der Kopfmitte positioniert ist. Dadurch wird suggeriert, dass dort auch die Höhenverstellung zu finden ist. Deshalb sollte diese dort belassen, und der Kabelabgang zwischen Stirn und Kopfmitte platziert werden. Dies hätte den weiteren Vorteil, dass die Kabel relativ kurz gehalten werden können und so weniger Gewicht entsteht. Da der Hebelarm nur einige Zentimeter beträgt, dürften die auftretenden Drehmomente nicht so groß werden.

Wie schon in Kapitel 3.1 erläutert, ist das Design ein durchaus relevanter Faktor für die Akzeptanz, deshalb sollte Wert auf ein ansprechendes Design gelegt werden. Während das Tragegestell in einer hellen, freundlichen Farbe zu gestalten ist, sollten die Riemen und Polster dunkel gehalten sein, um nicht aufzufallen, bzw. den

Gesamteindruck nicht zu stören. Weiterhin wäre es optisch von Vorteil, wenn durch ein geschicktes Design die zweifellos vorhandene Frontlastigkeit des Konzepts etwas verringert würde. Dies könnte mit einer eleganten Anbindung des Polsters am Hinterkopf kombiniert werden.

Die Aufgabe, ein Tragegestell mit entsprechender Befestigungs- und Einstellmöglichkeit zu konstruieren und herzustellen wurde bereits vielfach gelöst, beispielsweise bei HMDs oder Helmen aller Art. Deshalb kann die Frage nach der technischen Umsetzbarkeit nur bejaht werden. Dies gilt auch für die benötigten Einstellmöglichkeiten.

Um ein möglichst geringes Gewicht zu erzielen, ist es sinnvoll, bei der Konstruktion des Tragegestells Wert auf die Materialauswahl zu legen. Aus ergonomischer Sicht wäre ein möglichst leichtes und stabiles Material in allen Belangen von Vorteil. Niedriges Gewicht und hohe Stabilität könnten so gewährleistet werden. Neben diversen Kunststoffarten kommt dafür auch Karbon in Betracht. Eine Karbonkonstruktion wäre wesentlich stabiler als eine Kunststoffkonstruktion und hat aufgrund der Oberflächenstruktur ein ansprechendes Design. Weiterhin eignet sich das Herstellungsverfahren von Karbonteilen auch hervorragend für Kleinserien. Allerdings gibt es hier wie auch in der Automobilindustrie einen direkten Zusammenhang zwischen dem spezifischen Gewicht der Werkstoffe und den entstehenden Kosten. Diese müssen im Fall einer Karbonkonstruktion genauer betrachtet werden.

Unabhängig davon, welches Material verwendet wird, bietet sich die Möglichkeit an, das Gestell mit einer FEM- Berechnung zu optimieren. Letztendlich muss bei allen Überlegungen zur Konstruktion des Tragegestells auch die Herstellbarkeit gewährleistet sein.

Ob die ungünstige Gewichtsverteilung durch ein Gegengewicht am Hinterkopf verbessert werden kann, hängt natürlich von dem erzielten Gesamtgewicht ab. Somit kann diese Frage erst beantwortet werden, wenn die Detailkonstruktion erfolgt ist.

3.2 Verschiedene Ansätze für die Konzeption eines ergonomisch optimierten Head-Mounted Displays

Wie schon beschrieben, kommt der Positionierung der Bilderzeugung eine große Bedeutung zu. Neben dem Einfluss auf die Gewichtsverteilung muss natürlich auch die technische Machbarkeit berücksichtigt werden. In den folgenden drei Kapiteln werden verschiedene Ansätze vorgestellt und bewertet.

3.2.1 Bilderzeugung vor dem Auge

Um ein Bild vor dem Auge zu erzeugen, bietet sich die Möglichkeit an, ein oder mehrere Displays mit der entsprechenden Größe und einer passenden Optik direkt vor jedem Auge zu platzieren. Diese Lösung wurde in der Vergangenheit von vielen HMD-Herstellern gewählt. In Abbildung 33 sind beispielhaft zwei solche HMDs abgebildet. Das nVisor SX von der Firma nVis gehört zu den am meisten verkauften HMDs in Deutschland, beim piSight der Firma Sensics können zur Erhöhung der Auflösung bis zu 12 Displays pro Auge zusammengeschaltet werden.

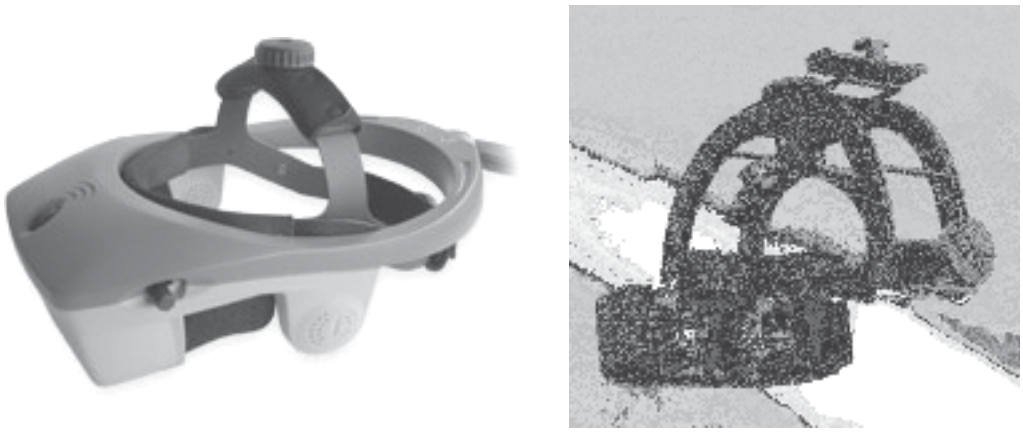


Abbildung 33: HMDs mit Displayanordnung vor den Augen (links nVisor SX (nVis, 2007), rechts Sensics piSight (Sensics, 2007)).

Der Ansatz vor jedem Auge ein großflächiges Display anzuordnen, weist zwei Nachteile auf. Einerseits führt dies zu einer sehr ungünstigen Gewichtsverteilung, anderseits müssen die Displays entsprechend groß sein, woraus wiederum ein höheres Gewicht resultiert. Beim piSight wurde das Problem der zu geringen Auflösung zwar gelöst, allerdings sind die Übergänge zwischen den einzelnen Displays sichtbar und stören den Stereoeindruck. Aufgrund der ungünstigen Gewichtsverteilung wird dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt.

3.2.2 Bilderzeugung hinter dem Ohr

Konzeptbedingt liegt auch ohne die Bilderzeugung ein Grossteil des Gewichts vor dem Ohr, sodass es sich anbietet, für eine ausgeglichene Gewichtsverteilung die Bilderzeugung hinter dem Ohr zu platzieren. Um das Bild nun nach vorne zum Spiegel zu bekommen, wäre es möglich auf ein Glasfaserkabel als Bildleiter zurückzugreifen, oder das Bild durch einen Lichtkanal am Ohr vorbei zu führen. In Abbildung 34 ist mit dem SEOS 120/40 ein HMD mit Lichtkanal dargestellt.

Abbildung 34: HMD SEOS 120/40 mit Bilderzeugung hinter dem Ohr und Lichtkanal (Haves & Blackham, 2004).

Das Verlagern von Display und Lichtquelle hinter das Ohr führt zweifelsfrei zu einer besseren Gewichtsverteilung um die Querachse. Der beim SEOS gewählte Lichtkanal erhöht aber mit der gesamten Optik das Gesamtgewicht beträchtlich. Weiterhin wird der Anwender durch den Lichtkanal akustisch teilweise von seiner Umgebung abgekoppelt.

Um das Bild mit einem Bildleiter am Ohr vorbei zu leiten, sind grundsätzlich zwei Ansätze vorstellbar. Die Übertragung könnte mit nur einem Bildleiter erfolgen, ähnlich wie bei einem Endoskop. Dies führt allerdings zu einer Verzerrung des Bildes. Prinzipiell ist es möglich, die Verzerrung bei der Berechnung des Bildes einzukalkulieren, dies würde allerdings zu einer Verschlechterung der Bildqualität führen. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung je eines Bildleiters pro Pixel, dies würde allerdings zu Verlusten an den Pixelecken führen, da ein Pixel eckig ist und ein Bildleiter rund.

3.2.3 Bilderzeugung vor dem Ohr

Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Bilderzeugung vor das Ohr zu legen, so kann einiges Gewicht eingespart werden. Allerdings verschlechtert sich auch die Gewichtsverteilung. Das eingesparte Gewicht könnte dann aber als entsprechendes korrekt positioniertes Gegengewicht am Hinterkopf verwendet werden.

Es bieten sich zwei Möglichkeiten an, das Display zu platzieren. Einerseits vor der Stirn, so kann das Bild von oben einspiegelt werden, anderseits wäre eine Position seitlich neben dem Kopf denkbar, bei der das Bild von der Seite eingespiegelt wird. Ein Einspiegeln von der Seite ist deshalb zu bevorzugen, weil die Bilderzeugung näher am gewünschten Schwerpunkt liegt und dadurch das auftretende Drehmoment kleiner ist. In Abbildung 35 ist beispielhaft ein Prototyp von Zeiss abgebildet, dieses monokulare see-through HMD zeigt recht innovativ, wie ein Bild von der Seite eingespiegelt werden kann.

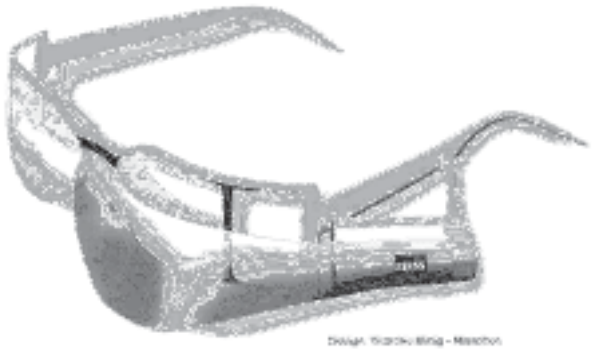


Abbildung 35: HMD mit seitlicher Bildeinspiegelung (Prototyp von Zeiss, 2007).

Letztendlich ist die Kombination aus seitlichem Display und Spiegeln vor den Augen die Lösung, bei der die meisten der ergonomischen Anforderungen erfüllt werden. Lediglich die Gewichtsverteilung ist nicht optimal, allerdings ist sie wesentlich besser, als wenn die Displays direkt vor dem Auge platziert würden.

Für dieses Konzept ist allerdings ein Freiformspiegel nötig, der das Bild vom Display ins Auge reflektiert. Der Spiegel muss so geformt sein, dass der Anwender außer dem Spiegel nur die natürlichen Begrenzungen des Gesichtsfeldes wie Nase und Augenbrauen sieht. Weiterhin muss der Spiegel das Bild vom Display so reflektieren, dass das gesamte Blickfeld abgedeckt ist. Eine komplette visuelle Abschottung durch

den Spiegel bietet den Vorteil, dass von außen kein störendes Licht einfällt. So wird einerseits der Immersionsgrad erhöht, andererseits verbessert sich die Bildqualität.

An dieser Stelle muss nun der Bereich zwischen Freiformspiegel und Kopf diskutiert werden. Beispielsweise kann zwar mit der Verstellmöglichkeit für den Augenabstand der Spiegel vor dem Auge horizontal positioniert werden. Die Nasenkontur an sich bleibt dabei aber unberücksichtigt, deshalb muss der Spiegel dort entsprechend geformt werden. Um bei dem Kontakt mit dem Gesicht Druckstellen zu vermeiden, muss die Spiegelkante gepolstert sein. Ähnliche Maßnahmen müssen auch für Augenbrauen- und Wangenkontur durchgeführt werden, dies kann zu einer nicht unerheblichen Reduzierung des idealen Field-of-View führen. Diese Problematik kann aber mit dem gewählten Freiformspiegel am besten gelöst werden, da dieser in seiner Form frei zu gestalten ist. Würde wie in Ansatz 1 ein Display vor dem Auge positioniert werden, gäbe es keine Möglichkeiten von der rechteckigen Form des Displays abzuweichen.

Die Berechnung dieses Spiegels ist komplex und kann nur mit Hilfe spezieller Software erfolgen. Notwendige Voraussetzungen für die Berechnung sind dabei die Festlegung des Bereiches, in dem sich der Spiegel später befinden soll, sowie die Position der Bilderzeugung gegenüber dem Auge. Die Firma VIAOPTIC aus Wetzlar wurde gebeten zu überprüfen, ob ein solcher Spiegel berechnet werden kann und herstellbar ist. Die Firma VIAOPTIC gelangte zu dem Ergebnis, dass es problemlos möglich sei, so einen Spiegel zu berechnen und herzustellen (Meyer, 2007). Favorisiert wurde ein bedampfter Kunststoffträger, der nicht nur leicht herzustellen ist, sondern auch über ein geringes Gewicht verfügt. Darüber hinaus weist er eine ausreichende Stabilität und Bruchsicherheit auf.

3.3 Vorstellung des erarbeiteten Konzepts

Im folgenden Kapitel wird nun das erarbeitete Konzept für ein ergonomisch optimiertes HMD vorgestellt.

Wie schon in Kapitel 3.2.3 erläutert, ist die Berechnung des Freiformspiegels ohne weiteres mit spezieller Software möglich, dabei müssen aber verschiedene Rahmenbedingungen wie Gesichtsformen und Position der Bilderzeugung berücksichtigt werden.

Nun soll das Tragegestell näher betrachtet werden. Dort ist in erster Linie die Position der Bedienelemente für die Verstellmöglichkeiten und die Lage des Kabelabgangs von Bedeutung. Ebenfalls wichtig sind die fünf Polster, die als Schnittstelle zwischen Tragegestellt und Kopf fungieren. Zählt man noch Bilderzeugung und Spiegel hinzu, sind alle Komponenten für das Package vorhanden. In Abbildung 36 sind exemplarisch für die abgebildete Kopfgröße alle Komponenten dargestellt.

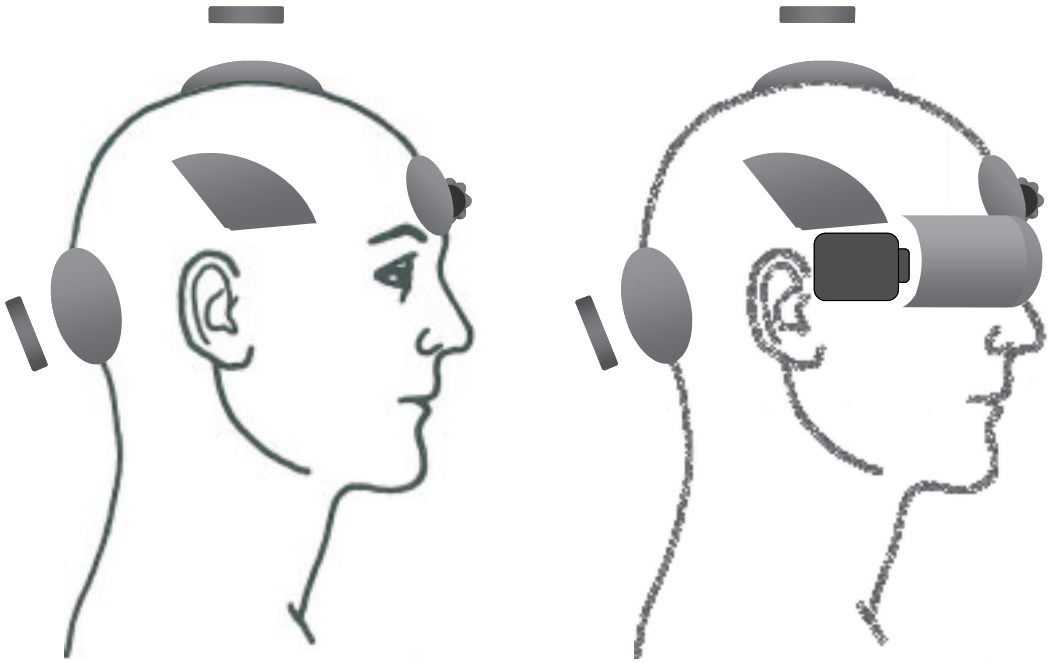


Abbildung 36: Position von der einzelnen Komponenten, Polster, Bedienelemente, Spiegel und Bilderzeugung.

Über dieses Package kann nun ein Tragegestell designed werden. Dabei sind die in Kapitel 3.1.1 erarbeiteten Richtlinien zu beachten. In Abbildung 37 ist eine mögliche Variante dargestellt, wie die einzelnen Komponenten durch ein Gestell miteinander verbunden werden könnten.

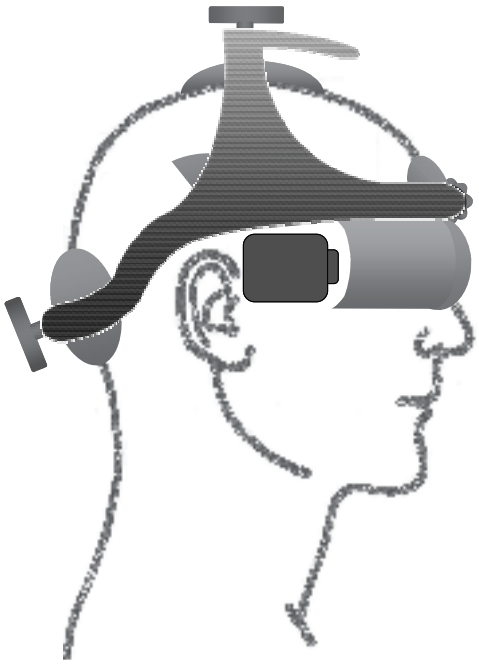


Abbildung 37: Seitenansicht des ergonomisch optimierten HMDs.

Um das HMD optimal an den Anwender anpassen zu können, wurden folgende Verstellmöglichkeiten und Einstellbereiche definiert (vgl. Kapitel 3.1.4):

- Augen-Scheitelhöhe 108 – 133 mm
- Kopfumfang 520 – 599 mm
- Pupillenabstand 50 – 67 mm.

3.4 Bewertung des Konzepts

Die Qualität des erarbeiteten Konzepts kann an zwei Punkten erkannt werden. Einerseits daran, wie viele der ergonomischen Anforderungen eingehalten worden sind, bzw. wie genau dies geschah. Anderseits muss die Auswirkung der getroffenen Kompromisse betrachtet werden. In Tabelle 9 sind die nicht eingehaltenen ergonomischen Anforderungen sowie die dazugehörigen Begründungen aufgeführt.

Tabelle 9: Nicht eingehaltene ergonomische Anforderungen (Technische Spezifikationen des Displays nach Sony, 2007).

Parameter	Anforderung	Umsetzung	Begründung
Auflösung horizontal Auflösung vertikal Bildformat, Seitenverhältnis	11100 Pixel; 1'/p 6600 Pixel; 1'/p 1,682 : 1	4096 Pixel; 2,71'/p 2160 Pixel; 2,71'/p 1,896 : 1	Kein entsprechendes Display verfügbar
Kontrast Bildwiederholrate	 > 80 Hz	4000 : 1 200 Hz	Spezifikation des Displays
Gewichtsverteilung bzgl. Längs- und Hochachse, Position der Bilderzeugung	Position hinter dem Ohr Schwerpunkt in Höhe des oberen Kopfgelenkes	Position vor dem Ohr Verschiebung nach oben um ca. 8-12 cm	Technisch nicht umsetzbar, Gewichtseinsparung Evtl. Kollision mit dem Hemdkragen, so liegt die Bilderzeugung Augenebene
Kabelabgang	Position in Verlängerung der Wirbelsäule	Position zwischen Höhenverstellung und Stirn	Räumliche Überschneidung mit d. Höhenverstellung

Die größte Abweichung ergibt sich zweifelsfrei bei der Auflösung. Wie in Kapitel 3.1.3 bereits erläutert, ist heute noch kein entsprechendes Display verfügbar. Diese Differenz bei der Auflösung kann also erst mit einem neuen Display behoben werden. Idealerweise sollte dieses neue Display dann auch das geforderte Seitenverhältnis von 1,682 : 1 aufweisen.

Die Auswirkungen dieser Abweichungen lassen sich nicht immer exakt beschreiben. Auch wenn das Sony 4K Display nicht den ergonomischen Anforderungen gerecht wird, dürfte sich mit seiner Verwendung gegenüber den heutigen Displays eine erhebliche Verbesserung erzielen lassen. Immerhin erweitert sich das Field-of-View beträchtlich, ohne dass sich die Auflösung pro Pixel verschlechtert. Weiterhin setzt das Sony 4K neue Maßstäbe bezüglich der Bildqualität. Inwieweit Bildqualität und

visuelle Wahrnehmung durch ein Display verbessert würden, das den Anforderungen hinsichtlich Auflösung und Seitenverhältnis entspräche, kann nicht gesagt werden. Mit Sicherheit wird es zu einer Erhöhung des Realitätseindrucks kommen, wodurch sich die Präsenz in der virtuellen Umgebung erhöht (Hofmann, 2002).

Durch die Verlagerung der Bilderzeugung vor das Ohr verschlechtert sich die Gewichtsverteilung des HMDs. Um diesen Faktor so klein wie möglich zu halten, sollte die Bilderzeugung möglichst nahe am Ohr positioniert werden. Die Position der Bilderzeugung ist allerdings nicht frei wählbar, sondern ergibt sich aus den Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 3.1.4).

Ebenfalls negativ auf die Gewichtsverteilung wirkt sich der hohe Schwerpunkt des HMDs aus. In diesem Konzept befindet sich die Bilderzeugung in einer Ebene mit den Augen, für die Gewichtsverteilung wäre es allerdings besser, wenn die Bilderzeugung weiter unten liegen würde. Um dies umzusetzen, müsste allerdings auf eine weitere Spiegeloptik zurückgegriffen werden. Diese und die dazugehörigen Aufhängungen würden allerdings das Gesamtgewicht des HMDs erhöhen und sich durch ihre Position vor dem Ohr negativ auf die Gewichtsverteilung auswirken. Weiterhin steigt beim Absenken der Bilderzeugung die Gefahr einer Kollision mit einem Hemdkragen oder ähnlichen Kleidungsstücken.

Die Lage des Kabelabgangs dürfte kaum negative Auswirkungen auf die gestellten Anforderungen haben. Allerdings können dadurch, dass der Abgang nicht exakt in der Verlängerung der Hochachse liegt, horizontale Kräfte über das Kabel auf den Kopf übertragen werden, die letztendlich Drehmomente erzeugen. Doch da der Hebel mit 4-5 cm recht klein ist, dürften keine großen Drehmomente entstehen. Es ergibt sich auch hier eine Verbesserung gegenüber bestehenden Lösungen, bei denen der Kabelabgang am Hinterkopf liegt. Weiterhin lässt sich durch die kürzere Kabelführung etwas Gewicht einsparen.

3.5 Umsetzung und Entwicklungsperspektiven

Um dieses Konzept in ein fertiges Produkt umzusetzen, sind noch einige Arbeiten durchzuführen. Die Komponenten, die bis jetzt noch nicht beachtet wurden, sind festzulegen und mit den bereits gewählten Komponenten auszukonstruieren.

Bisher wurde für die Bilderzeugung nur Position, Displaytyp und Leuchtmittelart definiert. Also müssen noch der exakte Aufbau gestaltet und die nötigen Komponenten ausgewählt werden.

Nun folgt noch ein Ausblick auf die technischen Aspekte der zukünftigen HMD-Entwicklung. Neben den vielfach genannten Punkten Display, Gesamtgewicht und Gewichtsverteilung gibt es nichts, was noch im größeren Umfang zu optimieren ist. Insbesondere das Auflösungsvermögen des Displays wird sich in Zukunft verbessern, sodass die geforderte Auflösung von einem Pixel pro Bogenminute auch bei einem großem Field-of-View realisiert werden kann.

Eine interessante Entwicklung, die in den letzten Jahren stattgefunden hat, ist die starke Verbreitung von Augmented Reality (AR)- Anwendungen (Nölle, 2006). Im Gegensatz zur VR konnten hier Anwendungsfelder in der Industrie erschlossen werden, wie beispielsweise die virtuelle Fabrik oder Tätigkeiten in den Bereichen Wartung und Kommissionierung. Das hier erarbeitete Konzept eines ergonomisch optimieren HMDs kann mit kleinen Modifizierungen auch als see-through HMD für AR-Anwendungen verwendet werden. Eigentlich muss nur der Spiegel gegen einen durchlässigen Spiegel ausgetauscht werden. Eine solche see-through Variante würde auch gegenüber bisherigen AR-HMDs eine immense Weiterentwicklung darstellen. Durch diese Flexibilität dürften sich die Chancen des Produktes am Markt erheblich verbessern.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtueller Umgebung durchgeführt. Deren Sicherstellung ist eine Grundanforderung an eine virtuelle Umgebung, die als produktives Werkzeug innerhalb eines Entwicklungsprozesses eingesetzt werden soll.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden zwei verschiedene Versuchsansätze ausgewählt. Als erstes wurden die Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung in virtueller Umgebung ermittelt und mit denen in realer Umgebung verglichen. Die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung tritt insbesondere bei der unzureichenden Einkalibrierung von haptischem Feedback auf, deshalb lassen sich hier weiterführend Richtlinien für das Kalibrieren von haptischem Feedback ableiten. Da die Erkennung dieser Divergenz eine entsprechende Immersion und Präsenz in der virtuellen Umgebung erfordert, stellt die Divergenz nicht nur ein Qualitätsmerkmal für die Einkalibrierung von realen Bauteilen dar, sondern auch für die gesamte virtuelle Umgebung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung in beiden Umgebungen gleich sind, es wurde kein signifikanter Einfluss der virtuellen Umgebung festgestellt. Die teilweise auftretenden Abweichungen waren eindeutig auf den Versuchsaufbau zurückzuführen.

Weiterhin konnten aus den Ergebnissen Richtlinien für die Einkalibrierung von Bauteilen als haptisches Feedback abgeleitet werden. Damit die Abweichung von 95% der Probanden nicht entdeckt wird, sollte für die translatorische Divergenz eine Abweichung von 6 mm nicht überschritten werden, für die rotatorische Divergenz liegt die Grenze bei 2°. Der Wert für die translatorische Divergenz deckt sich dabei mit den Werten von Ernst (2001) und liegt oberhalb der Genauigkeit der zielgerichteten Greifbewegung (vgl. HdE, 1989).

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Bewertung von ergonomischen Fragestellungen anhand eines Fahrzeugmodells in realer und in virtueller Umgebung miteinander verglichen. Es wurde geprüft, ob auch subjektive und individuelle Faktoren in der virtuellen Umgebung bewertet werden können. Auch hier zeigen die

Ergebnisse eine Übereinstimmung zwischen virtueller und realer Umgebung. Bei der Bewertung von ergonomischen Fragestellungen, bei denen ein komplexes haptisches Feedback erforderlich ist, zeigte sich allerdings eine Abweichung gegenüber der Bewertung in der realen Umgebung. Dies galt auch für Fragestellungen, bei denen ein großes Field-of-View benötigt wird.

Um die Beanspruchung der Versuchspersonen durch die virtuelle Umgebung zu ermitteln, wurden Fragen zur Cybersickness, zum Präsenzempfinden und zur Belastung durch den Versuch gestellt. Die Ergebnisse zeigen nur wenige negative Einflüsse durch die virtuelle Umgebung. Dies ist neben der hohen Qualität der verwendeten virtuellen Umgebung sicher auch auf das Versuchdesign zurückzuführen. Dort wurde darauf geachtet, die möglichen Belastungsfaktoren weitestgehend zu reduzieren, damit die Versuchsperson ihre volle Leistungsfähigkeit über die gesamte Versuchsdauer beibehalten konnte. Insgesamt konnte kein Einfluss aus der Belastung durch die virtuelle Umgebung auf die Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung festgestellt werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass Bildqualität und Tragekomfort des verwendeten HMDs verbesserungsbedürftig waren.

Aus den experimentellen Untersuchungen wird ersichtlich, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Wahrnehmung in virtueller und realer Umgebung vorliegt, deshalb sind hier keine direkten Verbesserungsmaßnahmen notwendig.

Damit wird das verwendete VR-System den Anforderungen, die für die Bewertung von ergonomischen Fragestellungen mit einem virtuellen Fahrzeugmodell gestellt werden, gerecht. Somit kann das System im Entwicklungsprozess eingesetzt werden.

Allerdings wurde ein erheblicher Verbesserungsbedarf bei dem verwendetet HMD ermittelt. Da aber kein am Markt erhältliches HMD allen ergonomischen Anforderungen genügt, wurde ein Konzept für ein ergonomisch optimales HMD erarbeitet.

Die Basis für dieses neue Konzept bilden dabei die ergonomischen Grundanforderungen an Bildqualität, Field-of-View, Tragekomfort und Bedienbarkeit. Aus diesen Grundanforderungen wurden entsprechende Gestaltungsvorschriften abgeleitet und anschließend auf ihre technische Umsetzbarkeit hin geprüft. Unter

Berücksichtigung der aktuell verfügbaren Möglichkeiten zur Bilderzeugung wurde ein Konzept erarbeitet und vorgestellt. Da allerdings auch die modernsten Displays nicht in der Lage sind, die benötigte Auflösung zur Verfügung zustellen, wurde bezüglich der Auflösung ein Kompromiss eingegangen, um das geforderte Field-of-View zu erreichen. Dieser Kompromiss bleibt aber nur solange bestehen bis entsprechende Displays verfügbar sind und ist somit nur eine Zwischenlösung. Alle anderen Komponenten des Head-Mounted Displays bleiben von diesem Kompromiss unberührt.

So ist ein Konzept für ein HMD entstanden, dass neben einem Field-of-View von 222° x 110° (horizontal x vertikal) auch eine nahezu optimale Gewichtsverteilung bietet. Weiterhin wurden entsprechende Verstellmöglichkeiten und die Anforderungen an einen minimalen Tragediskomfort berücksichtigt.

Ein Ausblick in die Zukunft lässt sich an dieser Stelle in drei Richtungen wagen.

Für die technische Weiterentwicklung von VR-Systemen lassen sich einige Schlüsseltechnologien identifizieren. Wie auch schon in den vergangen Jahren wird sich die Geschwindigkeit der VR-Systeme mit jeder neuen Chipgeneration steigern. Allerdings ist die Bildqualität noch weit von einer fotorealistischen Darstellung entfernt. Bis diese Techniken wie Ray-Traching den Einzug in den Produkt-entwicklungsprozess finden, wird noch einige Zeit vergehen. Eine deutliche Verbesserung der Bildqualität von Head-Mounted Displays lässt sich nur mit Displays erzielen, die eine wesentlich höhere Auflösung bereitstellen. Da die Entwicklung von Microdisplays durch die Unterhaltungsindustrie vorangetrieben wird, sind hier regelmäßig Weiterentwicklungen zu erwarten.

Doch sollte der Blick in die Zukunft nicht nur auf die technischen Möglichkeiten gerichtet sein. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits heutige VR-Systeme in der Produktentwicklung eingesetzt werden können. Es stellt sich die Frage, welche neuen Anwendungen sich für VR-Systeme bieten und auf welchem Weg die Ergonomie zur Weiterverbreitung von VR-Anwendungen beitragen kann. Große Defizite sind heute noch bei der ergonomischen Gestaltung von VR- Hardware vorhanden (vgl. auch Symietz, Ostermann & Zimmermann, 2001). Eine wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz

von VR-Systemen ist die einfache Anwendbarkeit der Hardware. Dies gilt nicht nur für Experten, sondern auch für Laienanwender wie Versuchspersonen oder Kunden.

Damit in Zukunft mehr ergonomische Fragestellungen im Entwicklungsprozess virtuell beurteilt werden können, müssen die Fähigkeiten von VR-Systemen zur Simulation von realen Zusammenhängen und Objekten sowie die Interaktionsmöglichkeiten gesteigert werden. Dies betrifft beispielsweise menübasierte Systeme wie Bordcomputer oder Navigationsgeräte und auch die Interaktion mit virtuellen Bauteilen. Die Interaktion in virtuellen Umgebungen bietet nicht nur auf der Anwendungsseite viel Potenzial, sondern erfordert auch eine entsprechende ergonomische Gestaltung, damit die virtuell ermittelten Ergebnisse auch in die Realität übertragbar sind.

5 Literatur

ALEXANDER, T.: DIE ZIELGERICHTETE ARMBEWEGUNG UNTER INFORMATORISCHER BELASTUNG, FORTSCHRITT-BERICHTE VDI, REIHE 22, NR. 10, VDI VERLAG, DÜSSELDORF, 2002.

A.R.T. GMBH: ACCURACY AND DELAY OF A.R.T. TRACKING SYSTEMS, ADVANCED REALTIME TRACKING GMBH, WEILHEIM, 2007.

A.R.T. GMBH: ADVANCED REALTIME TRACKING GMBH, WEILHEIM, URL: HTTP:///WWW.AR-TRACKING.DE, 24.10.2007a.

ARTHUR, K.W.: EFFECTS OF FIELD OF VIEW ON PERFORMANCE WITH HEAD-MOUNTED DISPLAYS, CHAPEL HILL, 2000.

BIMBER, O.: INTERACTIVE RENDERING FOR PROJECTION-BAESED AUGMENTED REALITY DISPLAYS, DISSERTATION AM FACHBEREICH FÜR INFORMATIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DARMSTADT, 2002.

BLANKENFELD, H.: DREIDIMENSIONALE BEWEGUNGSANALYSEN BEI BEWEGUNGS-STÖRUNGEN DER OBEREN EXTREMITÄT NACH SCHLAGANFÄLLEN, DISSERTATION AN DER NEUROLOGISCHEN KLINIK UND POLIKLINIK DER LUDWIG-MAXIMILIAN UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2002.

BORTZ, J.: LEHRBUCH DER STATISTIK, SPRINGER VERLAG, 1993.

BRAUN, M.: ENTWICKLUNG EINES VARIABLEN ERGONOMIE-PRÜFSTANDES MIT CAD-ANBINDUNG UND VALIDIERUNG EINER ARBEITSMETHODIK, DISSERTATION AM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 1998.

BROLL, W.: EIN OBJEKTORIENTIERTES INTERAKTIONSMODELL ZUR UNTERSTÜTZUNG VERTEILTER VIRTUELLER UMGEBUNGEN, GMD RESEARCH SERIES, NO. 11/1998. FORSCHUNGSZENTRUM INFORMATIONSTECHNIK GMBH, SANKT AUGUSTIN, 1998.

COSTELLO, P.J.: HEALT AND SAFETY ISSUES ASSOCIATED WITH VIRTUAL REALITY – A REVIEW OF CURRENT LITERATURE, DEPT. OF HUMAN SCIENCES, LOUGHBOROUGH UNIVERSITY, 1997.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG DIN EN ISO 8596: AUGENOPTIK – SEHSCHÄRFEPRÜFUNG - DAS NORMSEHZEICHEN UND SEINE DARBIETUNG, BEUTH, BERLIN, 1996.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG DIN 33402B: ERGONOMIE - KÖRPERMAßE DES MENSCHEN – TEIL 2: WERTE, BEUTH, BERLIN, 2005.

ENGSTLER, F.: UNTERSUCHUNG ZUR GRÖßENWAHRNEHMUNG IN VIRTUELLEN UMGEBUNGEN UND DEREN ANWENDUNG FÜR ERGONOMISCHE FRAGESTELLUNGEN, DIPLOMARBEIT AM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2005.

ERNST, M.O.: PSYCHOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR VISUOMOTORISCHEN INTEGRATION BEIM MENSCHEN, MEDIEN VERLAG KÖHLER, 2001.

FLÜGEL, B., GEIL, H., SOMMER, K.: ANTHROPOLOGISCHER ATLAS, EDITION WÖTZEL, FRANKFURT, 1986.

GOEBEL, M.: VON DER ÄRGONOMIE ZUR ERGONOMIE, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, 2000.

HDE: HANDBUCH DER ERGONOMIE. BUNDESAMT FÜR WEHRTECHNIK UND BESCHAFFUNG, HANSER VERLAG, KOBLENZ, 1989.

HAVES, T., BLACKHAM, G.: A HEAD MOUNTED DISPLAY FOR LOW-COST SIMULATION SOLUTIONS, SEOS LTD, BURGESS HILL, UK, 2004.

HOFMANN, J.: RAUMWAHRNEHMUNG IN VIRTUELLEN UMGEBUNGEN, DISSERTATION AM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2002.

KOHLHASS, M., SCHMIDT-TJARKEN, T.: TECHNISCHE ORTHESEN – HEAD-MOUNTED DISPLAYS IN VIRTUELLER REALITÄT, DIPLOMARBEIT AN DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, 1997.

LUCZAK, L., SCHMIDT, L., KOLLER, F. (HRSG.): BENUTZERZENTRIERTE GESTALTUNG VON AUGMENTED-REALITY-SYSTEMEN, FORTSCHRITT-BERICHTE VDI, REIHE 22, NR.17, VDI-VERLAG, DÜSSELDORF, 2004.

LOOMIS, J. M., LEDERMAN, S. J.: TACTUAL PERCEPTION, IN: BOFF, K.R., KAUFMAN, L., THOMAS, J.P. (EDS.), HANDBOOK OF PERCEPTION AND HUMAN PERFORMANCE, VOLUME II, COGNITIVE PROCESSES AND PERFORMANCE, PP. 31-1 - 31-41, WILEY ET AL, NEW YORK, 1986.

LORENZ, S., KAISER, R., ASSMANN, E., ENGSTLER, F., ZÖLLNER, R.: ERGONOMIEABSICHERUNG IM FAHRZEUG MITTELS MIXED REALITY: BEEINFLUSSUNG DER SITZPOSITION DURCH DIE VORGEHENSWEISE BEI DER SITZEINSTELLUNG, IN ZEITSCHRIFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT, NR.: 1/2008, ERGONOMIA VERLAG, STUTTGART, 2008.

MAYER, R.: MÜNDLICHE MITTEILUNG, 2007.

MEDECO: HOMEPAGE DER FIRMA MEDECO, HTTP://WWW.MEDECO.DE/INDEX.PHP?ID=241, 13.12.2007.

NEUGEBAUER, R., WEIDLICH, D. KOLBIG, S., POLZIN, T.: PERSPEKTIVEN VON VIRTUAL-REALITY-TECHNOLOGIEN IN DER PRODUKTIONSTECHNIK- VRAX®, 4. CHEMNITZER PRODUKTIONSTECHNISCHES KOLLOQUIUM CPK, IWU, 2004.

NÖLLE, S.: AUGMENTED REALITY ALS VERGLEICHSWERKZEUG AM BEISPIEL DER AUTOMOBILINDUSTRIE, DISSERTATION AM INSTITUT FÜR INFORMATIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2006.

NVIS: HOMEPAGE DER FIRMA NVIS, HTTP://WWW.NVISINC.COM/PRODUCT.PHP?ID=1, 23.11.2007.

OEHLSCHLAEGER, H.: VIRTUELLE PRODUKTENTWICKLUNG BEI VW NUTZFAHRZEUGE. AUTOMOBIL- MOTORTECHNISCHE KONFERENZ, STUTTGART, 2003.

PICASA: HOMEPAGE DER FIRMA PICASA, HTTP://PICASAWEB.GOOGLE.COM/HONORIA.STARBUCK/TEACHINGLIFEDRAWINGSTUDENTWORK/PHOTO#5166998030612473506, 27.05.2008.

PROTEAU, L.: ON THE SPECIFITY OF LEARNING AND THE ROLE OF VISUAL INFORMATION FOR MOVEMENT CONTROL. IN: PROTEAU, L., ELLIOTT, D. (HRSG.): VISION AND MOTOR CONTROL, SEITE 67-105, NORTH-HOLLAND, AMSTERDAM 1992.

REGENBRECHT, H.: FAKTOREN FÜR PRÄSENZ IN VIRTUELLER ARCHITEKTUR, DISSERTATION AN DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, 1999.

RIECKE, B.E., VON DER HEYDE, M., BÜLTHOFF, H.H.: HOW REAL IS VIRTUAL REALITY REALLY? COMPARING SPARTIAL UPDATING UNSING POINTING TASKS IN REAL AND VIRTUAL ENVIRONMENTS, JOURNAL OF VISION, VOL. 1, 2001.

SENSICS: HOMEPAGE DER FIRMA SENSICS, HTTP://WWW.SENSICS.COM/NEWS/PRESSKIT.PHP, 23.11.2007.

SCHMIDTKE, H.: ERGONOMIE, 3. AUFLAGE, HANSER VERLAG, MÜNCHEN, 1993.

SCHIEDERMEIER, C.: SKRIPTUM ZU „COMPUTERGRAPHIK 1“, FACHHOCHSCHULE NÜRNBERG, 2004.

SCHRADER, K.: ENTWURF UND REALISIERUNG EINES ERGONOMIE-MOCK-UPS UNTER VERWENDUNG VON METHODEN DER VIRTUELLEN REALITÄT, DISSERTATION AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, 2003.

SCHULTE-PELKUM, J., RIECKE, B.E., VON DER HEYDE, M., BÜLTHOFF, H.H.: PERCIVING AND CONTROLING SIMULATED EGO-ROTATIONS FROM OPTIC FLOW: INFLUENCE OF FIELD OF VIEW (FOV) AND DISPLAY DEVICES ON ERGO-MOTION PERCEPTION, 2002.

SCHWANECKE, U.: VIRTUAL REALITY, EIN OXYMORON MIT ZUKUNFT. . , VORLESUNG AN DER FACHHOCHSCHULE WIESBADEN, 2004.

SLATER, M., WILBUR, S.: A FRAMEWORK FOR IMMERSIVE VIRTUAL ENVIRONMENTS (FIVE): SPECULATIONS ON THE ROLE OF PRESENCE IN VIRTUAL ENVIRONMENTS, PRESENCE: TELEOPERATORS AND VIRTUAL ENVIRONMENTS, VOL. 2, PP. 211-233, 1997.

SONY: SXRD PROJECTORS FOR LARGE-VENUE APPLICATIONS, SONY ELECTRONICS INC, 2006.

STÄBLER M.: SYSTEMVERGLEICH ZWEIER VR-SYSTEME - VOM DATENFLUSS BIS ZUM ECHTZEIT-RAYTRACHING, DIPLOMARBEIT AN DER FACHHOCHSCHULE ANSBACH, 2007.

STEREO OPTICAL COMPANY: RANDOT STEREOTESTS, BESCHREIBUNG DES RANDOT®-TESTS, STEREO OPTICAL COMPANY, CHICAGO, 1995.

STEUER, J.: DEFINING VIRTUAL REALITY: DIMENSIONS DETERMINING TELEPRESENCE, JOURNAL OF COMMUNICATION, 42 (4), PP. 73-93, 1992.

SYMIETZ, M., OSTERMANN, F., ZIMMERMANN, P.: ASPEKTE DER VIRTUELLEN PRODUKTENTSTEHUNG – VIRTUELLE UND AUGMENTIERTE REALITÄT, 10. PRODUKTIONSTECHNISCHES KOLLOQUIUM, BERLIN, 2001.

VELHAGEN, K.: TAFELN ZUR PRÜFUNG DES FARBENSINNES, 23. AUFLAGE, GEORG THIEME VERLAG, STUTTGART, 1963.

VOß, T., BUBB. H.: UNTERSUCHUNGEN ZUR DIVERGENZ ZWISCHEN VISUELLER UND HAPTISCHER WAHRNEHMUNG IN VIRTUELLER REALITÄT, 53. KONGRESS DER GESELLSCHAFT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT, MAGDEBURG, 2007.

VOß, T.: ANALYSE DER BEURTEILUNGS- UND ENTSCHEIDUNGSSICHERHEIT BEI DER ANWENDUNG VON VIRTUELLEN METHODEN FÜR DIE BEWERTUNG VON ERGONOMISCHEN FRAGESTELLUNGEN IN DER KONZEPTENTWICKLUNG. IN: GÖTTIG, R., SCHUBERT, G. (HRSG.) FORUM 3D, 3D-TECHNOLOGIEN AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2007.

VOß, T., MERGL, C., BUBB, H.: EINFLUSS VON VIRTUELLER REALITÄT AUF DIE MENSCHLICHE WAHRNEHMUNG AM BEISPIEL DER DIVERGENZ ZWISCHEN VISUELLER UND HAPTISCHER WAHRNEHMUNG. IN: KOSCHKE, R., HERZOG, O., RÖDIGER, K.-H., RONTHALER, M. (HRSG.): INFORMATIK 2007 – INFORMATIK TRIFFT LOGISTIK, BEITRÄGE DER 37. JAHRESTAGUNG DER GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIK E.V. (GI), BREMEN, 2007.

WILLEMSEN, P., GOOCH, A. A., THOMPSON, W. B., CREEM-REGEHR, S. H.: EFFECTS OF STEREO VIEWING CONDITIONS ON DISTANCE PECEPTION IN VIRTUAL EVIRONMENTS, SCOOL OF COMPUTING, UNIVERSITY OG UTAH, SALT LAKE CITY, 2005.

ZEISS: HOMEPAGE DER FIRMA ZEISS, HTTP://WWW.ZEISS.DE/C1256A770030BCE0/WEBVIEWALLD/CAD435CBF1FE7C21C1256EA7002E0713, 23.11.2007.

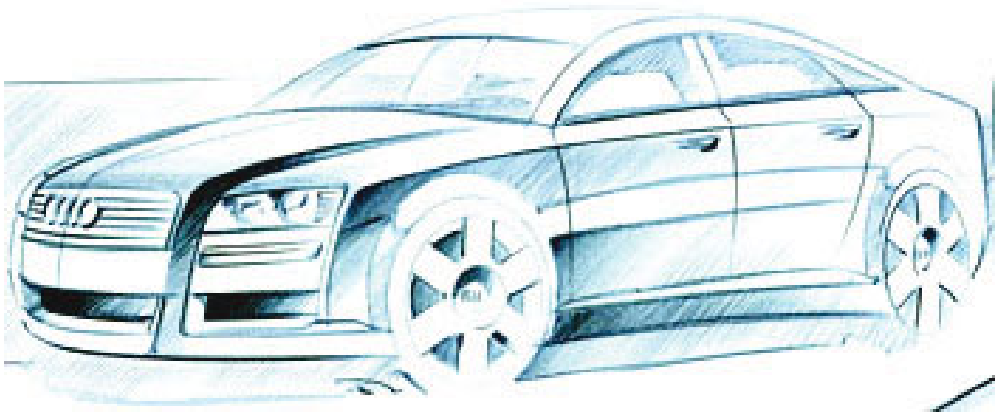
Anhang

Anhang A-1: Fragebögen

Fragebogen zu den Versuchen in virtueller Umgebung

Versuchspersonennummer: _____

Fragebogen



Im Folgenden werden Ihnen einige persönliche Fragen sowie Fragen zum Versuchsablauf gestellt. Bitte beantworten Sie alle Fragen. Falls Ihnen Fragestellungen unklar sind, wenden Sie sich bitte an den Versuchsleiter.

Selbstverständlich werden alle Ihre Angaben streng vertraulich behandelt!!

I. Fragen zu Ihrer Person

1. ***Bitte geben Sie Ihr Geburtsjahr an . . .***

   19___

2. ***Sind Sie ....?***

   ○ weiblich ○ männlich

3. ***Was ist Ihr Familienstand?***

   ○ ledig ○ verheiratet ○ geschieden ○ verwitwet

4. ***Sind Sie ...?***

   ○ Linkshänder ○ Rechtshänder ○ beides

5. ***Benutzen Sie eine Sehhilfe?***

   ○ nein ○ ja

   5.a. ***Falls ja, tragen Sie überwiegend eine ...?***

   ○ Brille
   ○ Kontaktlinsen
   ○ Brille und Kontaktlinsen zu gleichen Teilen

   5.b. ***Falls ja, zu welchen Gelegenheiten nutzen Sie Ihre Sehhilfe?***

   ○ Autofahren ○ Lesen ○ Computer ○ Immer

   5.c. ***Falls ja, mit wie viel Dioptrien L/R pro Auge?***

   Linkes Auge____ Rechtes Auge____

   5.d. ***Falls ja, warum benötigen Sie eine Seehilfe?***

   ○ Weit-/Kurzsichtig ○ Hornhautverkrümmung ○ Achse

6. ***Was ist Ihr höchster Ausbildungsabschluss?***

   ○ Hauptschulabschluss ○ Mittlere Reife ○ Abitur
   ○ Fachhochschulabschluss ○ Hochschulabschluss ○ Promotion

7. ***Welche Art von Berufsausbildung/Studium haben Sie abgeschlossen?***

   _____

8. ***Welche Tätigkeit üben Sie derzeit aus?***

_____

9. ***Üben Sie eine Sportart aus?***

_____

II. Fragen zur Computernutzung

10. ***Wie viele Stunden pro Tag nutzen Sie Ihren Computer am Arbeitsplatz?***

0-2h	2-4h	4-6h	Mehr als 6h
○	○	○	○

11. ***Bitte geben Sie an, wie sich Nutzung Ihres Computers am Arbeitsplatz aufteilt.*** *Die Angaben sollten insgesamt 100% ergeben.*

Textverarbeitung:_____%

CAD: _____%

Sonstige: _____%

12. ***Wie viel Stunden in der Woche nutzen Sie Ihren privaten Computer?***

Kein privater Computer	0-3h	3-6h	Mehr als 6h
○	○	○	○

13. ***Bitte geben Sie an, wie sich Nutzung Ihres privaten Computers aufteilt.*** *Die Angaben sollten insgesamt 100% ergeben.*

Textverarbeitung: _____%

Computerspiele: _____%

Sonstige: _____%

14. ***Haben Sie Erfahrungen mit VR-Systemen?***

○ nein ○ ja

13.a ***Falls ja, mit welchem System (Mehrfachnennung möglich)?***

Virtuelle Sitzkiste	Fahrsimulator	Powerwall	Cave/L-Pro
○	○	○	○

15. ***Bitte kreuzen Sie die Antwortmöglichkeit an, die für Sie am ehesten zutrifft.***

Ich interessiere mich sehr wenig für Technik: _____

Ich interessiere mich wenig für Technik: _____

Ich interessiere mich sehr für Technik: _____

Ich interessiere mich sehr stark für Technik: _____

16. ***Arbeiten Sie gerne mit Computern?***

○ ja ○ nein

III. Fragen zur Cybersickness I

17. ***Haben Sie manchmal nach langer Bildschirmarbeit Schwindelgefühl, Kopf- oder Augenschmerzen?***

○ ja ○ nein

18. ***Haben Sie Schwierigkeiten im Auto während der Fahrt zu lesen?***

○ ja ○ nein

19. ***Haben Sie schon einmal negative Erfahrungen mit anderen VR-Systemen, 3D-Kino, Fahrsimulatoren etc. gehabt?***

○ ja ○ nein

IV. Fragen zum Präsenzempfinden

VP: ___

20. ***Bitte beantworten Sie die Fragen in der folgenden Tabelle.***

Haben Sie den Eindruck, in der computererzeugten Welt präsent zu sein… überhaupt nicht ○ ○ ○ ○ ○ ○ sehr stark 1 2 3 4 5 6
Achten Sie noch auf die reale Umgebung? trifft gar nicht zu ○ ○ ○ ○ ○ ○ triff völlig zu 1 2 3 4 5 6
Erscheint Ihnen die virtuelle Welt wirklicher als die reale Welt? trifft gar nicht zu ○ ○ ○ ○ ○ ○ triff völlig zu 1 2 3 4 5 6
Haben Sie das Gefühl, dass Sie nur Bilder sehen? trifft gar nicht zu ○ ○ ○ ○ ○ ○ triff völlig zu 1 2 3 4 5 6
Ihre reale Umgebung ist Ihnen nicht mehr bewusst? trifft gar nicht zu ○ ○ ○ ○ ○ ○ triff völlig zu 1 2 3 4 5 6
Wie sehr gleicht Ihr Erleben der virtuellen Umgebung dem Erleben in einer realen Umgebung? überhaupt nicht ○ ○ ○ ○ ○ ○ vollständig 1 2 3 4 5 6
Empfinden Sie das virtuelle Fahrzeuginterieur als real? hatte nicht den Eindruck ○ ○ ○ ○ ○ ○ hatte den Eindruck 1 2 3 4 5 6
Haben Sie das Gefühl, in einem virtuellen Raum zu sein? hatte nicht das Gefühl ○ ○ ○ ○ ○ ○ hatte das Gefühl 1 2 3 4 5 6
Wie real erschien Ihnen die virtuelle Umgebung? gar nicht real ○ ○ ○ ○ ○ ○ vollkommen real 1 2 3 4 5 6
Ist Ihre Aufmerksamkeit von der virtuellen Welt völlig in Bann gezogen? trifft gar nicht zu ○ ○ ○ ○ ○ ○ trifft völlig zu 1 2 3 4 5 6
Wie bewusst ist Ihnen die reale Welt, während Sie sich in der virtuellen Welt befinden (z.B. Geräusche, Raumtemperatur, andere Personen etc.)? extrem bewusst ○ ○ ○ ○ ○ ○ unbewusst 1 2 3 4 5 6
Fühlen Sie sich im virtuellen Raum anwesend? trifft gar nicht zu ○ ○ ○ ○ ○ ○ trifft völlig zu 1 2 3 4 5 6

V. Fragen zur Cybersickness II

VP: ___

21. ***Hatten Sie während des Versuchs Probleme mit Unwohlsein oder Schwindelgefühlen?***

○ nein ○ ja

19.a. ***Falls ja, wie häufig?***

	Zum Anfang	Gelegentlich	Oft	Ständig
Unwohlsein, Schwindelgefühle	○	○	○	○

19.b. ***Falls ja, wie stark?***

	Sehr Schwach	Schwach	Mittel	Stark
Unwohlsein, Schwindelgefühle	○	○	○	○

22. ***Hatten Sie während des Versuchs Probleme mit Ermüdungs-erscheinungen?***

○ nein ○ ja

20.a. ***Falls ja, wie häufig?***

	Zum Ende	Gelegentlich	Oft	immer
Ermüdungserscheinungen	○	○	○	○

20.b. ***Falls ja, wie stark?***

	Sehr Schwach	Schwach	Mittel	Stark
Ermüdungserscheinungen	○	○	○	○

23. ***Könnten Sie sich vorstellen, ein HMD auch privat für Computerspiele etc. zu nutzen?***

○ nein ○ ja

VI. Fragen zum Versuch

24. ***Bitte kreuzen Sie in der folgenden Tabelle an, ob und wie stark Sie die Komponenten des Versuchaufbaus während des Versuchs gestört haben?***

	Als störend Empfunden		sehr schwach	schwach	teils teils	stark	sehr stark
Unscharfes Bild	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Ruckeln, nachziehen des Bildes	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Tragekomfort des HMD	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Tragekomfort des Handschuhs	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Sitzposition	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Genauigkeit der Körpervisualisierung	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O

25. ***Bitte kreuzen Sie in der folgenden Tabelle an, wie Sie die Dauer des Versuchs gestört hat!***

	Als störend Empfunden		sehr schwach	schwach	teils teils	stark	sehr stark
Dauer des Versuchs bzgl. des HMD Komforts	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Dauer des Versuchs bzgl. Visualisierung	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O
Dauer des Versuchs bzgl. Greifaufgaben	O ja O nein	falls ja, wie stark:	O	O	O	O	O

26. ***Was kann man Ihrer Meinung nach noch am Versuchsablauf verbessern?***

Vielen Dank für das Ausfüllen des Fragebogens!

Hier noch Gelegenheit für Bemerkungen und Kritik!

VII. Mess- und Testergebnisse

27. ***Augenabstand:*** _____cm

28. ***Größe mit Schuhen:*** _____cm

29. ***Fingergröße:*** groß___ klein___

30. ***Visus:*** links___ rechts___

31. ***Farbsehtest***

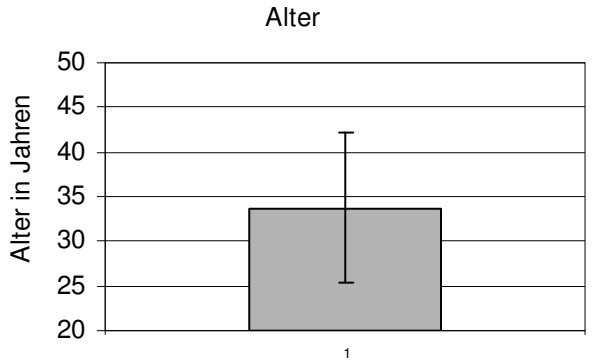
○ bestanden ○ nicht bestanden

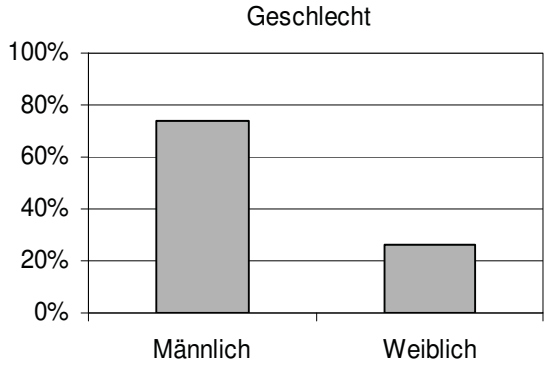
32. ***Stereosehtest***

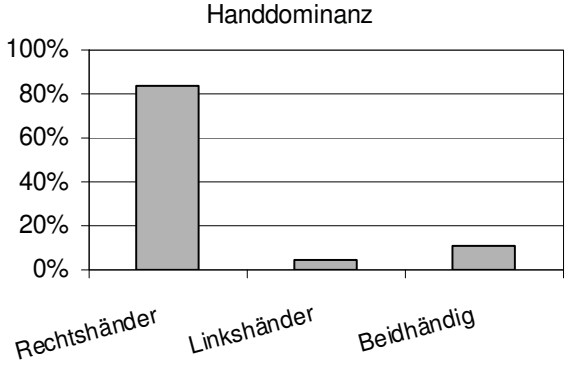
○ bestanden ○ nicht bestanden

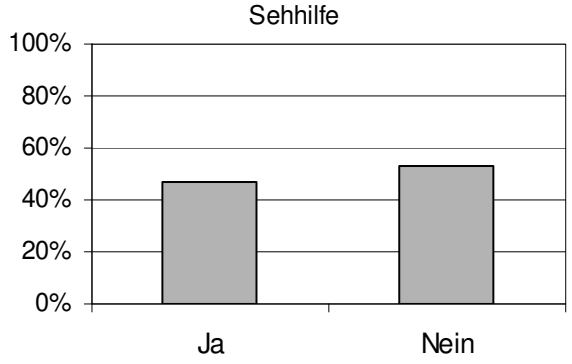
Anhang A-2: Ergebnisse der Fragebögen

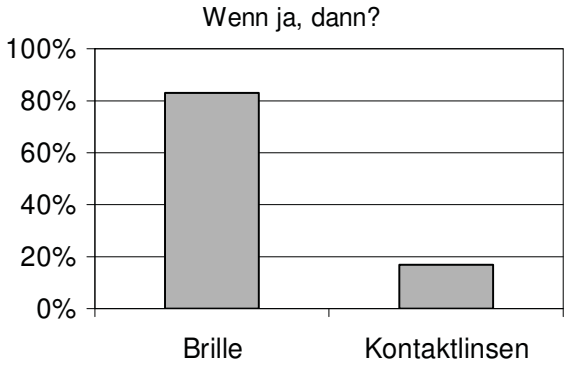
1. Fragen zur Person

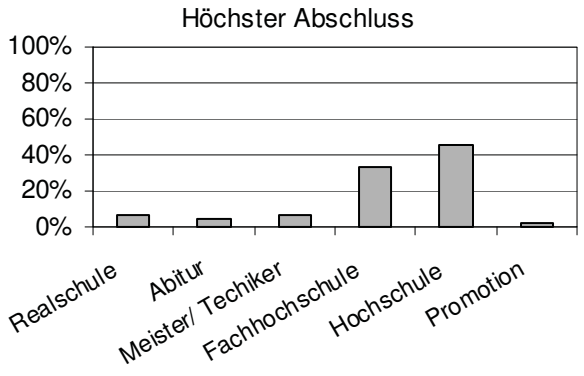






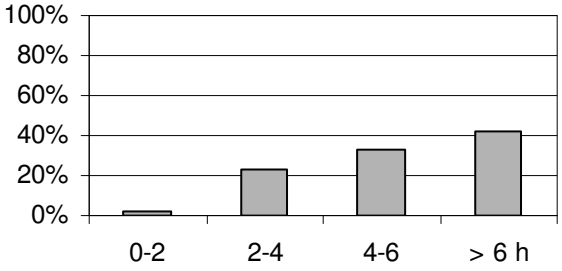




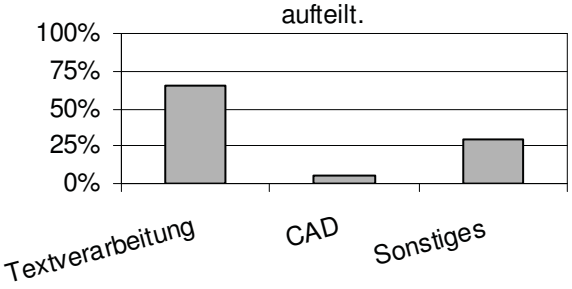


2. Fragen zur Computernutzung

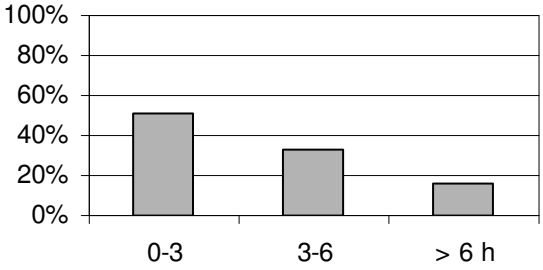
Wie viele Stunden pro Tag nutzen Sie Ihren Computer am Arbeitsplatz?



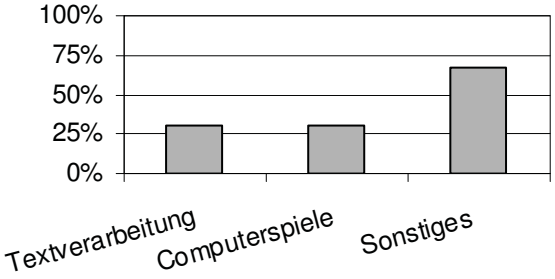
Bitte geben Sie an, wie sich Nutzung Ihres Computers am Arbeitsplatz aufteilt.



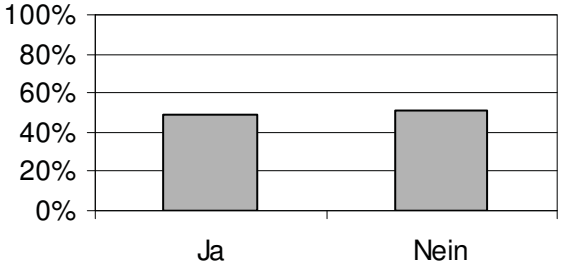
Wie viel Stunden in der Woche nutzen Sie Ihren privaten Computer?



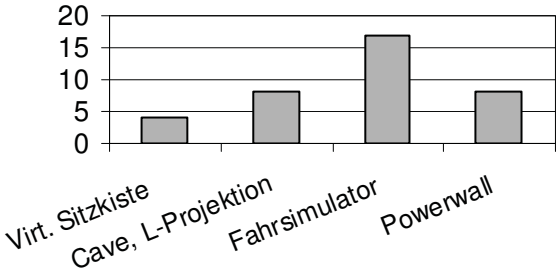
Bitte geben Sie an, wie sich Nutzung Ihres privaten Computers aufteilt.



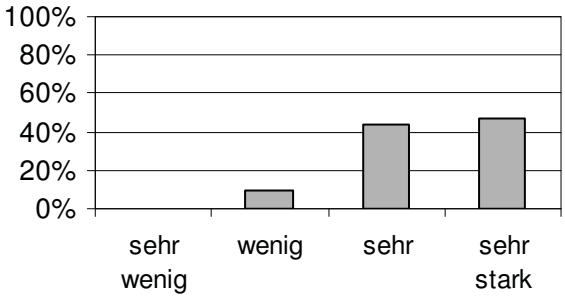
Haben Sie Erfahrungen mit VR-Systemen?



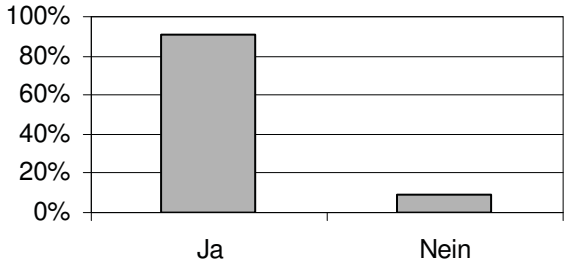
Falls ja, mit welchem VR-System haben Sie Erfahrungen?



Wie stark interessieren Sie sich für Technik?

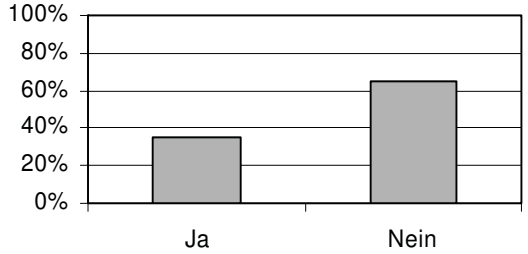


Arbeiten Sie gerne mit Computern?

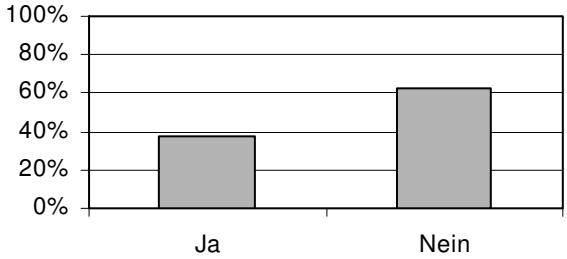


3. Fragen zur Cybersickness Teil 1

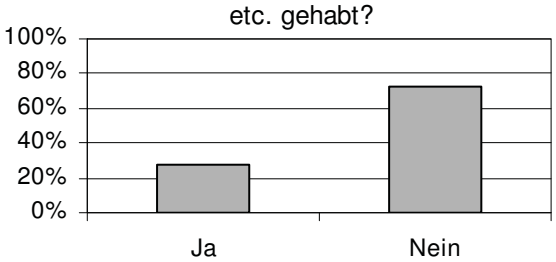
Haben Sie manchmal nach langer Bildschirmarbeit Schwindelgefühl, Kopf- oder Augenschmerzen?



Haben Sie Schwierigkeiten im Auto während der Fahrt zu lesen?

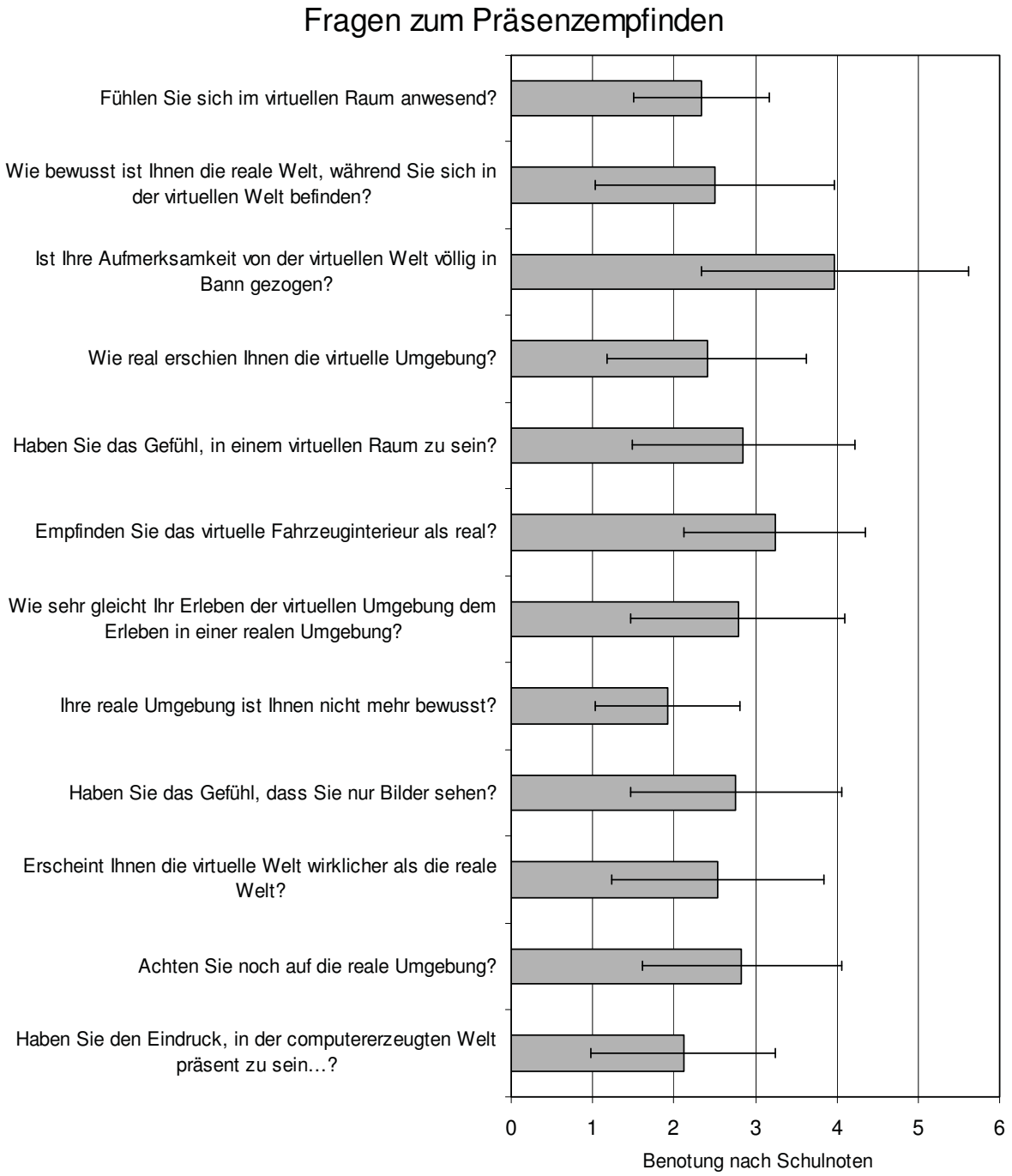


Haben Sie schon einmal negative Erfahrungen mit anderen VR-Systemen, 3D-Kino, Fahrsimulatoren etc. gehabt?

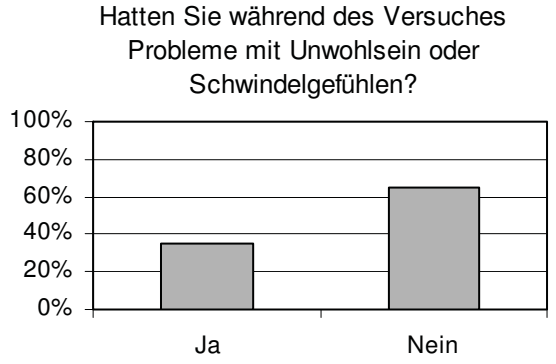


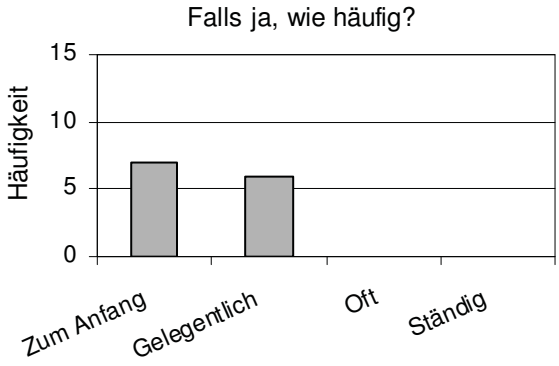
4. Fragen zum Präsenzempfinden

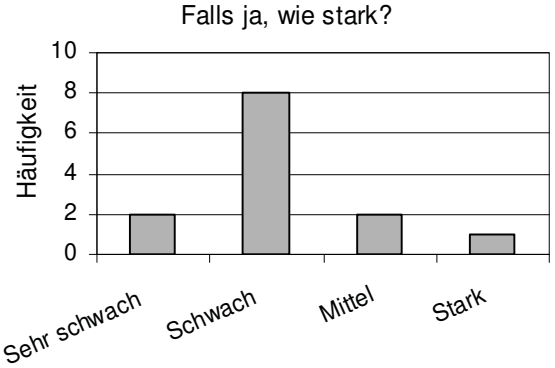
(Angelehnt an Hofmann, 2004)

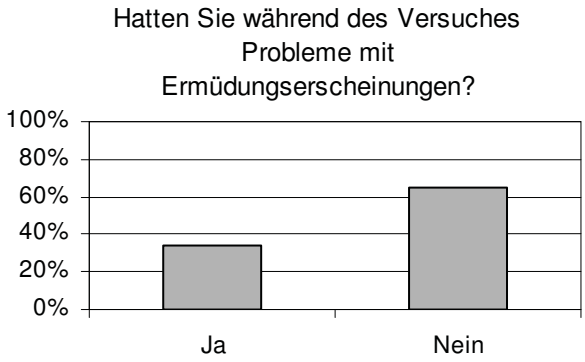


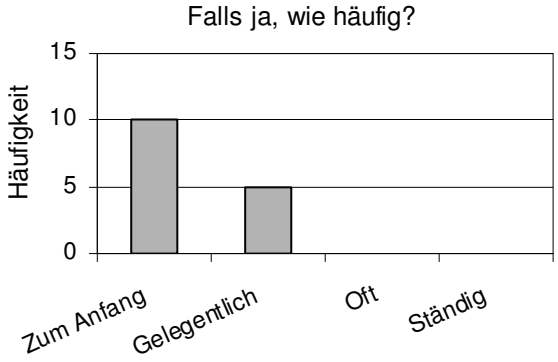
5. Fragen zur Cybersickness Teil 2

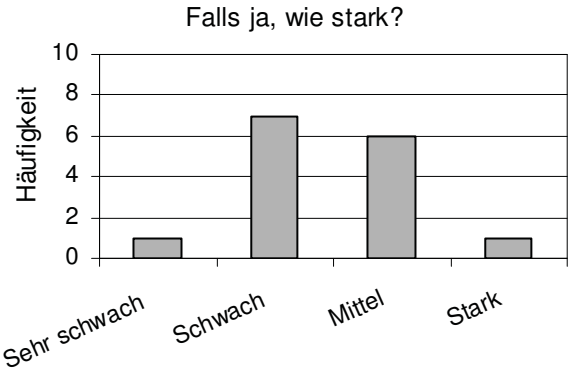




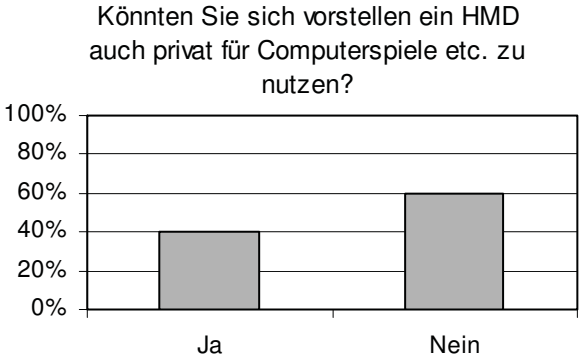




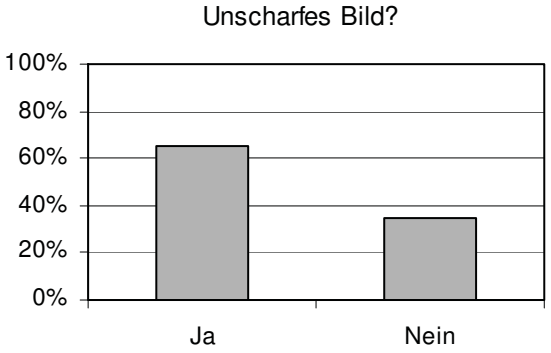


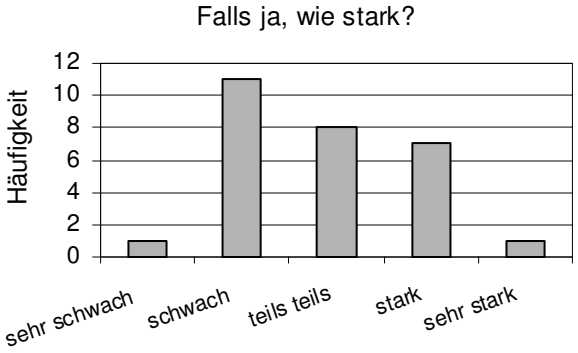


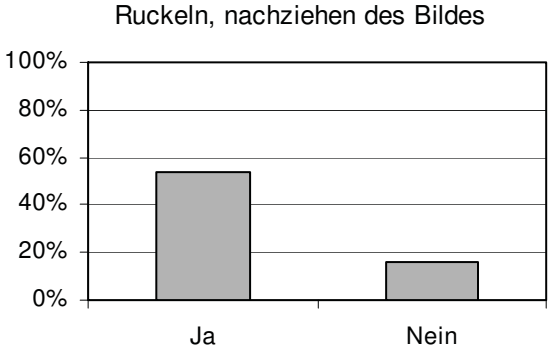
Fragen zur Cybersickness Teil 2

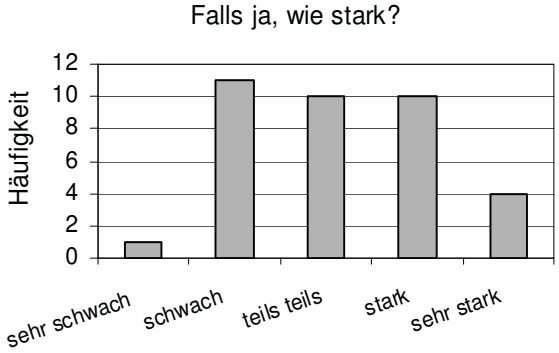


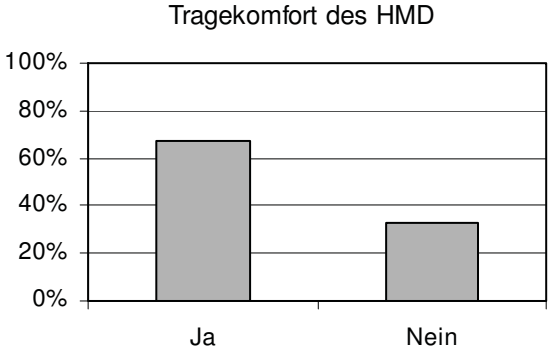
6. Belastung der Versuchsperson durch den Versuch

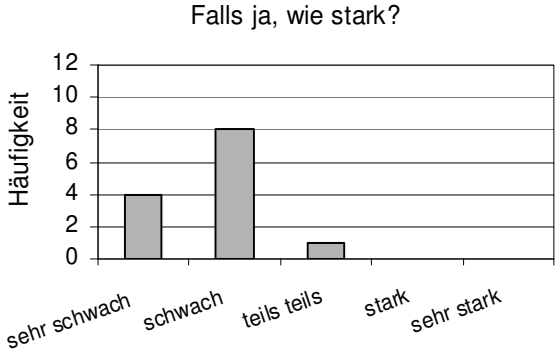




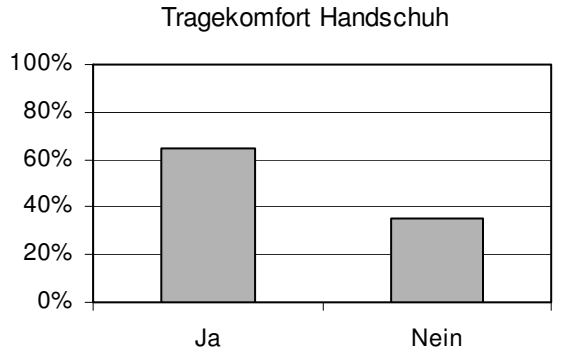


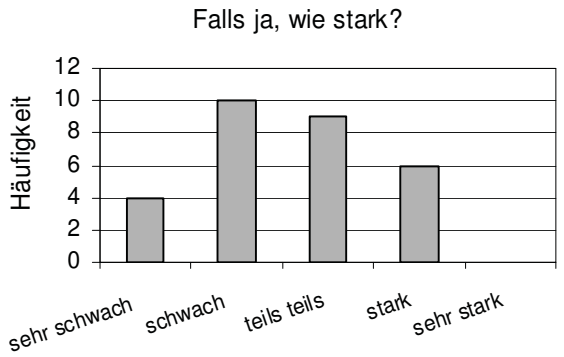


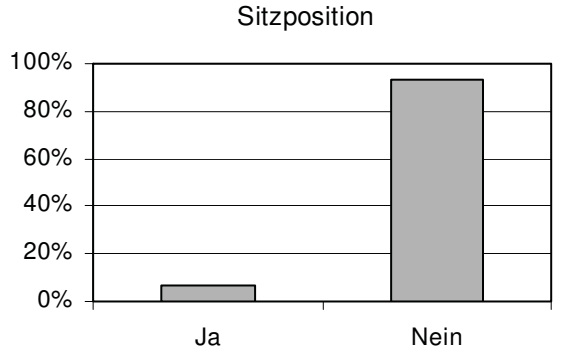


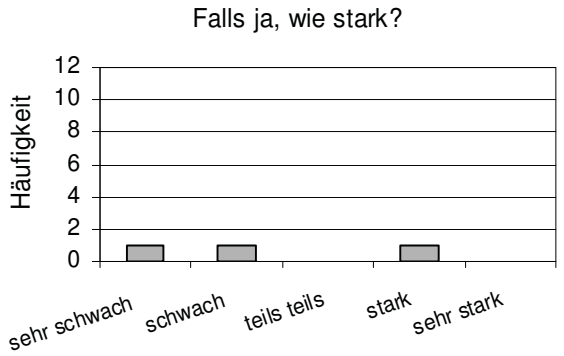


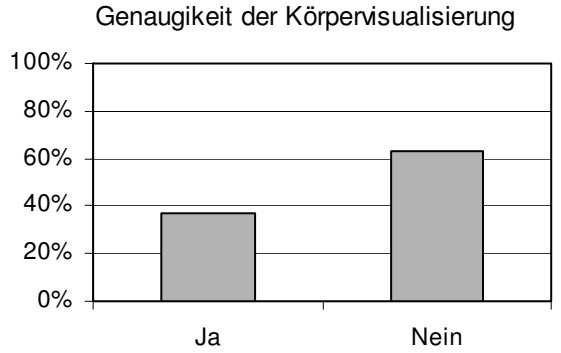
Belastung der Versuchsperson durch den Versuch

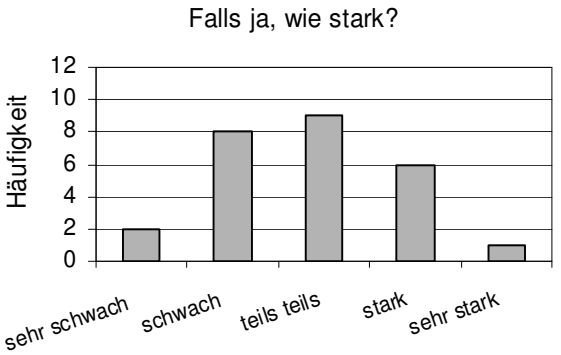


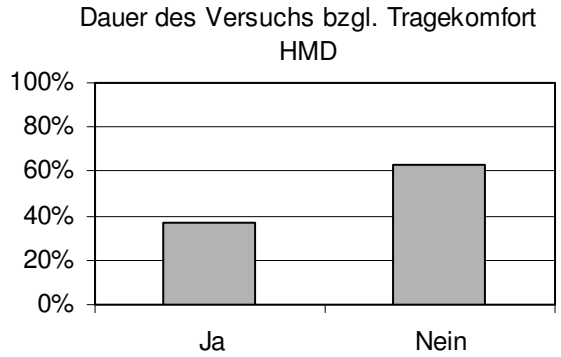


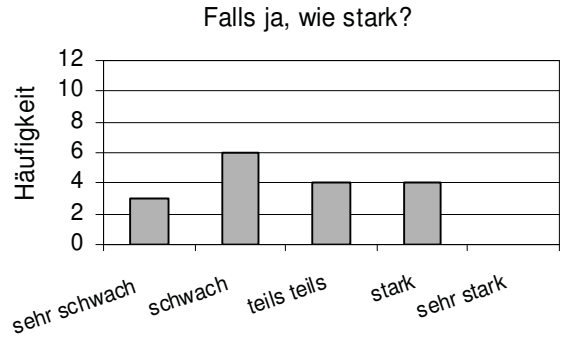




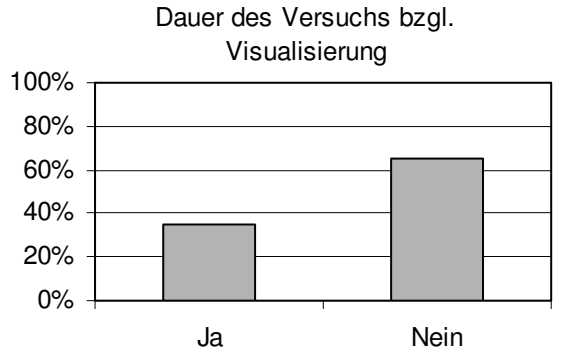


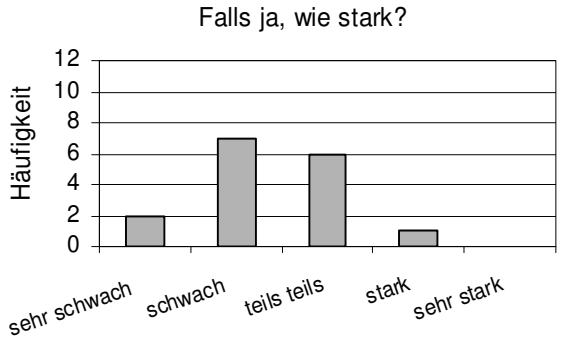


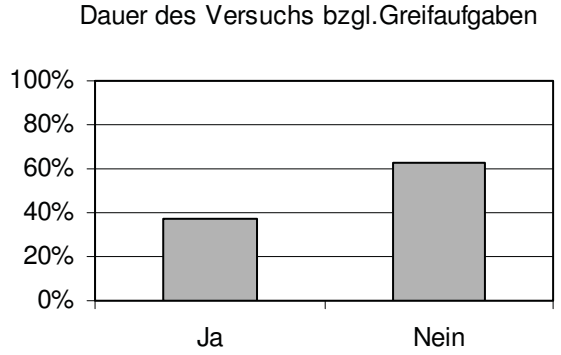


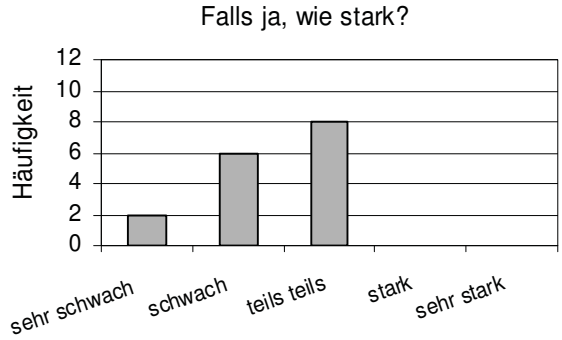


Belastung der Versuchsperson durch den Versuch

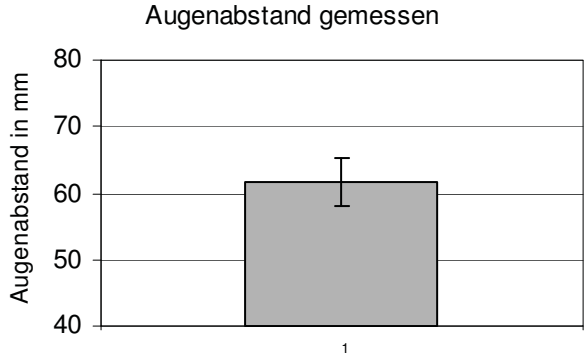


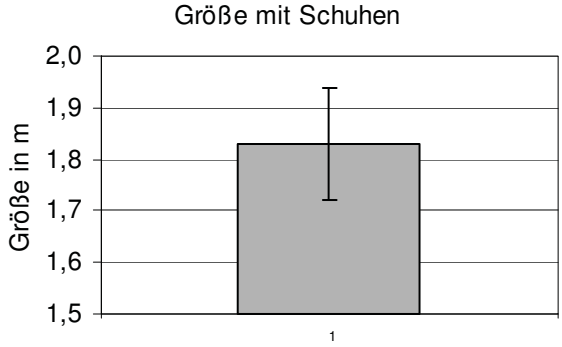




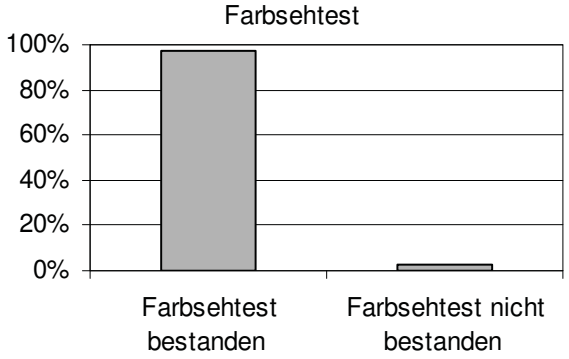


7. Mess- und Testergebnisse





Mess- und Testergebnisse



Anhang B: Ergebnisse der Wahrnehmungsschwelle für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung

Tabelle 10: Vergleich der Wahrnehmungsschwellen für die Divergenz zwischen visueller und haptischer Wahrnehmung in Abhängigkeit der Umgebung (t-Test mit ungepaarter Stichprobe, zweiseitig).

Sichtuntersuchungen		Virtuelle Umgebung	Reale Umgebung	Standard-abw.	t-Test
Translatorische Divergenz	Gruppe vorne / hinten	19,6 mm	18,9 mm	8,1 mm	0,75
	Gruppe links /rechts	13 mm	20,5 mm	9 mm	0,002
Rotatorische Divergenz	Gruppe vorne / hinten	6°	4,2°	1,8°	0,01
	Gruppe links /rechts	6°	4,6°	2,3°	0,02

Tabelle 11: Vergleich der Wahrnehmungsschwellen für die rotatorische Divergenz in Abhängigkeit vom Datenhandschuh und Umgebung.

Versuchsanordnung	Mittelwert	Standardabweichung
Reale Umgebung ohne Handschuh	3,7°	1,2°
Reale Umgebung mit Handschuh	5,1°	0,9°
Virtuelle Umgebung mit Handschuh	5,3°	1,8°

Tabelle 12: Vergleich der Versuchsanordnungen bei der rotatorischen Divergenz in Abhängigkeit vom Datenhandschuh und Umgebung (t-Test mit ungepaarter Stichprobe zweiseitig).

Versuchsanordnung	t-Test
Reale Umgebung ohne Handschuh zu Reale Umgebung mit Handschuh	0,003
Reale Umgebung mit Handschuh zu Virtuelle Umgebung mit Handschuh	0,73

Anhang C: Ergebnisse des Vergleiches der Bewertung eines Fahrzeugmodells in virtueller und in realer Umgebung

Tabelle 13: Vergleich der Bewertung eines Fahrzeugmodells in virtueller und in realer Umgebung auf Basis einer Schulnotenskala (t-Test mit ungepaarter Stichprobe, zweiseitig).

Sichtuntersuchungen	Virtuelles Fzg.-modell	Reales Fzg.-modell	Standard-abw.	t-Test
Sicht auf Kombiinstrument	1,33	1,67	0,62	0,172
Mitteldisplay Lage/Sichtbarkeit	1,42	1,75	0,72	0,264
Klimabedienteil Auffindbarkeit	2,17	2,09	0,90	0,832
Sichtbeeinträchtigung durch Säulen	2,67	3,00	0,82	0,294
Raumgefühl	2,17	2,08	0,76	0,748
Kopffreiheit	2,25	1,50	0,50	0,010
Greifuntersuchungen				
Fensterheber Erreichbarkeit	2,64	3,33	1,03	0,584
Türinnenbetätigung Erreichbarkeit	1,67	2,42	0,64	0,005
Armauflage Tür Nutzbarkeit	4,09	2,42	1,04	0,002
Cupholder Erreichbarkeit	3,30	3,42	1,19	0,814
Klimabedienteil Erreichbarkeit	2,33	2,75	1,09	0,308
Handschuhkastenöffner Erreichbarkeit	2,67	1,83	0,55	0,003

Anhang D: Verwendetet Systeme

Grafikberechnung:

Virtual Design 2 (VD2)
Version: 4.5.2
vrcom GmbH
Morneweg Straße 2
64293 Darmstadt.

Virtuelles Menschmodell:

RAMSIS-VR
Version: 4.5.2
HumanSolutions GmbH
Europaallee 10
67657 Kaiserslautern.

Trackingsystem:

DTrack
Version: 1.23.6
Kameras: DTrack 2
Datenhandschuh und Fingertracking
Version: 1.0.1
Advanced Realtime Tracking GmbH
Am Öferl 6
82362 Weilheim.

Head Mounted Display:

Typ: SEOS 120/40
SEOS Ltd.
Edward Way
Burgess Hill
West Sussex
RH15 9UE, UK.

Masterrechner:

Prozessoren:	Zwei Intel Xeon DualCore 3,2 GHz
Arbeitsspeicher:	4 GB
Grafikkarte:	Nvidia Quadro FX 3400
Betriebssystem:	Red Hat Enterprise Linux WS3

Clientrechner:

Prozessor:	Intel Pentium4 3,6 GHz
Arbeitsspeicher:	4 GB
Grafikkarte:	Nvidia Quadro FX 4500
Betriebssystem:	Red Hat Enterprise Linux WS3

Rechner Trackingsystem:

Prozessor:	2,8 GHz
Arbeitsspeicher:	256 MB
Betriebssystem:	Windows 2000

RAMSIS-VR Server:

Version:	4.5.2
Prozessor:	3,6 GHz
Arbeitsspeicher:	3,25 GB
Grafikkarte:	NVIDIA Quadro FX 1400
Betriebssystem:	Windows XP Professional

Anhang E: Verwendete Hilfsmittel

Bestimmung des Visus:

Binoptometer (nach Reiner), Tischausführung
Testscheibe 5962, nach DIN EN ISO 8596
Hersteller: Oculus Optikgeräte GmbH
Münchholzhäuser Straße 29
35582 Wetzlar.

Stereosehtest:

Stereo Optical Company: Randot Stereotests, Beschreibung des Randot®-Tests, Stereo Optical Company, Chicago, 1995.

Farbsehtest:

Velhagen, K.: Tafeln zur Prüfung des Farbensinnes, 23. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1963.

Spiegelberechnung:

VIAOPTIC GmbH
Ludwig-Erk-Str. 7
35578 Wetzlar.