

Wahrnehmung in Virtuellen Welten

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Naturwissenschaftlichen Fachbereiche

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Hartwig Distler

aus Ezelheim

Berlin, 2003

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr. Karl Gegenfurtner und Prof. Dr. Heinrich Bülhoff für die Betreuung der Arbeit. Prof. Bülhoff sei besonders für das zur Verfügung stellen eines einmaligen und inspirierenden Arbeitsumfeldes gedankt. Prof. Gegenfurtner gilt besonderer Dank, da er mich aus den Träumen virtueller Welten zurück in die wissenschaftliche Realität geholt und somit erst eine Fertigstellung der Arbeit möglich gemacht hat.

Mein Dank gilt des weiteren der Vielzahl jener Menschen, die meine „virtuellen Jahre“ in Tübingen begleitet haben, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen und, die mir in intensiven Streitgesprächen geholfen haben, meinen Weg zu finden.

Ich widme diese Arbeit den lieben Menschen aus meinem familiären Umfeld, die immer für mich da waren, wenn ich Hilfe brauchte; die an mir fest gehalten und an mich geglaubt haben, obwohl es mir nur selten gelang, Ihnen die Zeit und Aufmerksamkeit zu widmen, die sie verdient hätten.

Inhaltsverzeichnis

Abstrakt.....	1
1 Überblick und Zusammenfassung der Arbeit.....	3
1.1 Wahrnehmung und Virtuelle Realität.....	3
1.1.1 <i>Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung</i>	3
1.1.2 <i>Virtuelle Realität</i>	4
1.1.3 <i>Grundlage gemeinsamer Experimente</i>	5
1.2 Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in Fahrsimulatoren.....	5
1.3 Geschwindigkeitskonstanz.....	7
1.4 Navigation in realen und virtuellen Welten.....	8
1.5 Fazit.....	9
1.6 Wegweiser.....	9
2 Verwendung virtueller Welten zur Untersuchung menschlicher Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen	11
2.1 Traditionelle Wahrnehmungsforschung.....	11
2.2 Vergleichende Betrachtung von Versuchsumgebungen.....	12
2.2.1 <i>Anforderungen an die Versuchsumgebung</i>	12
2.2.2 <i>Anforderungen an die Umwelt</i>	12
2.2.3 <i>Anforderungen an das experimentelle Design</i>	13
2.2.4 <i>Zusammenfassung</i>	14
2.3 Vorteile virtueller Welten in der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung.....	14
2.4 „Virtuelle Wahrnehmungsforschung“.....	15
3 Einführung in die Virtuelle Realität	17
3.1 Grundlagen Virtueller Welten.....	17
3.2 Geschichte der Virtuellen Realität	18
3.3 Informationsfluss zwischen Mensch und Umwelt.....	22
3.3.1 <i>Einleitung</i>	22
3.3.2 <i>Informationskreislauf in der natürlichen Umwelt</i>	22
3.3.3 <i>Informationskreislauf in der virtuellen Umwelt</i>	23
3.3.4 <i>Besonderheiten des Informationsflusses in virtuellen Welten</i>	24
3.3.5 <i>Photorealismus und Funktionalität</i>	25
3.3.6 <i>Virtualität als Teil der Realität</i>	25
3.3.7 <i>Anwendung von Wissen der Wahrnehmungsforschung</i>	26
3.3.8 <i>Zusammenfassung</i>	28
4 Wahrnehmungsforschung und Virtuelle Welten - eine zweiseitige Beziehung	29
4.1 Zwei Untersuchungen in einem Experiment.....	29
4.2 Überblick zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung	29
4.3 Überblick zur Geschwindigkeitskonstanz	29
4.4 Überblick zur Wahrnehmung in realen und virtuellen Welten.....	30
5 Versuchsaufbau	31
5.1 Hardware.....	31
5.2 Software.....	33
5.2.1 <i>3D Computer-Graphikmodelle</i>	33
5.2.2 <i>Echtzeit-Animation</i>	33
6 Geschwindigkeitswahrnehmung in Virtuellen Welten	34
6.1 Beschreibung der Ausgangssituation	34
6.2 Denkansätze zur Problembewegung	35
6.3 Visuelle Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung	38
6.4 Allgemeine Beschreibung der Versuchsdurchführung.....	40
6.5 Offener vs. Geschlossener Regelkreis in Experimenten	41

6.6	Ortsfrequenz und Kontrast	41
6.6.1	Einleitung	41
6.6.2	Versuchsdurchführung	43
6.6.3	Bestimmung der Ortsfrequenz und des Kontrastes.....	46
6.6.4	Ergebnisse und Diskussion.....	47
6.7	Zusatzexperiment: Einfluss des Kontrastes auf die Geschwindigkeit.....	50
6.7.1.1	Einleitung	50
6.7.1.2	Versuchsdurchführung	51
6.7.1.3	Ergebnis	51
6.7.1.4	Diskussion	52
6.7.2	Zusammenfassung	52
6.7.3	Bedeutung der Ergebnisse für VR-Entwickler.....	53
6.7.4	Bedeutung der Ergebnisse für die Verwendung von Projektoren.....	54
6.8	Größe des Gesichtsfeldes	57
6.8.1	Ausgangssituation	57
6.8.2	Einleitung	57
6.8.3	Versuchsdurchführung	58
6.8.4	Ergebnis	59
6.8.5	Diskussion	60
6.9	Einfluss der Dichte von Objekten auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit	61
6.9.1	Einleitung	61
6.9.2	Versuchsdurchführung	62
6.9.3	Ergebnis	63
6.9.4	Diskussion	64
6.10	Zusammenfassung der Ergebnisse	65
7	Geschwindigkeitskonstanz.....	67
7.1	Einleitung und Definition.....	67
7.2	Überblick.....	68
7.3	Geschichte der Geschwindigkeitskonstanz	69
7.3.1	Einleitung.....	69
7.3.2	Brown (1928, 1931) und Wallach (1939).....	70
7.3.3	Smith und Sherlock (1958)	71
7.3.4	Rock, Hill, Fineman (1968).....	71
7.3.5	Wist, Diener, Dichgans (1976).....	72
7.3.6	Epstein (1978).....	72
7.3.7	McKee, Welch (1989), Zohary, Sittig (1993) und McKee, Smallman (1997).....	72
7.3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse früherer Arbeiten	73
7.4	Geschwindigkeitskonstanz in Alltagssituationen	74
7.4.1	Flugzeug-Illusion von Hershenson & Samuels (1999).....	75
7.4.1.1	Interpretation Nr. 1: Fehleinschätzung der Entfernung	75
7.4.1.2	Interpretation Nr. 2: Fehleinschätzung durch den direkten Einfluss der objektiven Größe des Flugzeuges....	77
7.4.2	Landeanflug von Flugzeugen	78
7.5	Allgemeine Einführung der Experimente.....	78
7.6	Material und Methoden – Allgemeine Beschreibung.....	80
7.6.1	Versuchsumgebung	80
7.6.2	Experimentelles Design.....	80
7.6.3	Versuchsdurchführung	81
7.6.4	Vorkehrungen und Anmerkungen	82
7.7	Startposition der Fahrzeuge.....	83
7.8	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	84
7.8.1.1	Relative Geschwindigkeit.....	84
7.8.1.2	Geschwindigkeitskonstanzfaktor.....	86
7.9	Gliederung der Experimente	87
7.10	Geschwindigkeitskonstanz in einer virtuellen Umgebung	88
7.10.1	Einleitung.....	88
7.10.2	Versuchsdurchführung	88
7.10.3	Ergebnis	88
7.10.4	Diskussion	89
7.11	Kontrollexperimente zur Evaluation des Parameterraumes	89

7.11.1	<i>Einfluss der Größe des Bildschirms (Monitor vs. Projektionsleinwand)</i>	90
7.11.2	<i>Monokulare und Binokulare Betrachtung der Szene</i>	90
7.11.3	<i>Gleichzeitige vs. sequentielle Präsentation der Fahrzeuge</i>	91
7.11.4	<i>Einfluss der Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges</i>	91
7.11.5	<i>Geschwindigkeitskonstanz in unterschiedlichen Entfernungen</i>	91
7.11.6	<i>Bewegungsrichtung der Fahrzeuge</i>	92
7.11.7	<i>Peripheres Sehen und Geschwindigkeitskonstanz</i>	93
7.11.8	<i>Integration von Augenbewegungssignalen</i>	94
7.11.9	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluationsexperimente</i>	94
7.12	Der Einfluss lokaler Bewegungsinformation auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit	95
7.12.1	<i>Einleitung</i>	95
7.12.2	<i>Allgemeine Beschreibung des Versuchsdesigns</i>	96
7.12.3	<i>Computer-Graphik 3D- Modell der Roboterfigur</i>	96
7.12.4	<i>Bewegungsmodell der Roboterfigur</i>	97
7.12.5	<i>Vorkehrungen</i>	98
7.12.6	<i>Kontrollexperiment: Der Einfluss der Schrittweite auf die wahrgenommene Geschwindigkeit</i> ... 99	
7.12.6.1	<i>Einleitung</i>	99
7.12.6.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	99
7.12.6.3	<i>Beziehung zwischen Schrittweite, Schrittfrequenz und Geschwindigkeit des Roboters</i>	100
7.12.6.4	<i>Ergebnis</i>	100
7.12.6.5	<i>Schlussfolgerung</i>	101
7.12.7	<i>Objektive Geschwindigkeit und lokale Bewegungsinformation</i>	101
7.12.7.1	<i>Einleitung</i>	101
7.12.7.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	101
7.12.7.3	<i>Ergebnis</i>	102
7.12.7.4	<i>Diskussion</i>	102
7.13	Einfluss von Entfernungshinweisen auf die Geschwindigkeitskonstanz	103
7.13.1	<i>Einleitung</i>	103
7.13.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	104
7.13.3	<i>Ergebnis</i>	106
7.13.4	<i>Diskussion</i>	107
7.14	Der Einfluss der Größe von Objekten auf die Geschwindigkeitskonstanz	107
7.14.1	<i>Einleitung</i>	107
7.14.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	108
7.14.3	<i>Ergebnis</i>	109
7.14.4	<i>Diskussion</i>	110
7.15	Der Einfluss von Vorwissen auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit	111
7.15.1	<i>Einleitung</i>	111
7.15.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	111
7.15.3	<i>Ergebnis</i>	112
7.15.4	<i>Diskussion</i>	112
7.16	Ausblick: Zusammenhang zwischen wahrgenommener Größe, Entfernung und Geschwindigkeit 113	
7.16.1	<i>Einleitung</i>	113
7.16.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	114
7.16.2.1	<i>Vergleich der Geschwindigkeit</i>	114
7.16.2.2	<i>Gemeinsamkeiten des Vergleichs der Größe und der Entfernung</i>	115
7.16.2.3	<i>Vergleich der Größe</i>	115
7.16.2.4	<i>Vergleich der Entfernung</i>	115
7.16.3	<i>Ergebnis</i>	116
7.16.3.1	<i>Berechnungen der relativen Größe und Entfernung</i>	116
7.16.3.2	<i>Darstellung der Ergebnisse</i>	117
7.16.3.3	<i>Ergebnis des Geschwindigkeitsvergleichs</i>	117
7.16.3.4	<i>Ergebnis des Entfernungsvergleichs</i>	117
7.16.3.5	<i>Ergebnis des Größenvergleichs</i>	119
7.16.4	<i>Diskussion</i>	120
7.17	Zusammenfassung der Experimente	121
7.18	Bedeutung der Ergebnisse für Entwickler virtueller Welten	125
7.19	Anmerkungen zur Darstellung von Fahrzeugen	126

8	Navigation in realen und virtuellen Welten	128
8.1	Einleitung	128
8.2	Versuchsparadigma	128
8.3	Erwerb räumlichen Wissens in VR-Umgebungen	129
8.4	Schätzen der Richtung und Entfernung von Plätzen in der realen und virtuellen Welt	131
8.4.1	<i>Einleitung</i>	131
8.4.2	<i>Versuchsdurchführung in der natürlichen Umwelt</i>	132
8.4.3	<i>Versuchsdurchführung in der virtuellen Umwelt</i>	133
8.4.4	<i>Computer-Graphikmodell der Landschaft</i>	134
8.4.5	<i>Echtzeit-Simulation</i>	134
8.4.6	<i>Versuchsablauf und Versuchsbedingungen</i>	135
8.5	Unterschiede in der Versuchsdurchführung zwischen realer und virtueller Welt	136
8.6	Versuchspersonen	136
8.7	Ergebnis	137
8.7.1	<i>Richtungsschätzungen</i>	137
8.7.2	<i>Entfernungsschätzungen</i>	137
8.7.2.1	Fehlertypen	137
8.7.2.2	Luftlinienentfernung	138
8.7.2.3	Zurückgelegter Weg	139
8.7.3	<i>Diskussion</i>	140
8.7.3.1	Interpretation der Ergebnisse	140
8.7.3.2	Schlussfolgerungen	142
9	Zusammenfassung	143
Anhang A	Aufbau der VR-Simulationsanlage	146
A.1	Einleitung	146
A.2	Erste Generation des Fahrradsimulators (1994)	146
A.3	Das VR-Fahrrad	147
A.3.1	<i>Motivation – Warum ein Fahrrad als Interaktionsgerät ?</i>	147
A.3.2	<i>Beschreibung des VR-Fahrrades</i>	151
A.3.3	<i>Allgemeine Betrachtung</i>	153
A.3.4	<i>Anforderungen von Experimenten zur Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung</i>	154
A.3.5	<i>Modifikationen des Aufbaus des VR-Fahrrades</i>	156
A.3.6	<i>Berechnung der Position und der Orientierung des Fahrrad-Fahrers</i>	157
A.3.7	<i>Weiterführende Betrachtungen zur Fahrdynamik</i>	158
A.3.8	<i>Vestibuläre Informationen</i>	158
A.3.9	<i>Allgemeine Betrachtungen zum Fahrrad</i>	160
A.4	Zweite Generation der Simulationsumgebung	161
A.4.1	<i>Größe des Gesichtsfeldes</i>	161
A.4.2	<i>Implementierung</i>	161
A.4.3	<i>Korrektur der Geometrieverzerrungen</i>	163
A.4.4	<i>Kalibration der Helligkeit und Farbe</i>	164
A.5	Dritte Generation der Simulationsumgebung	165
A.6	Ausblick	168
Literatur	170

Abstrakt

In den letzten Jahren haben Neu-Entwicklungen in der Informationstechnologie eine Echtzeit-Interaktion des Menschen mit realistisch erscheinenden künstlichen Welten möglich gemacht. Derartige Interaktionen mit digitalen Welten, die im Fachjargon unter dem Begriff *Virtuelle Realität* zusammengefasst sind, eröffnen sowohl der Industrie als auch der biologisch-psychologischen Erforschung der menschlichen Wahrnehmung einzigartige Perspektiven.

Aufgrund der Komplexität der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten ergibt sich eine besonders enge Verbindung zwischen der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung und der Entwicklung neuer Technologien. In dieser Verbindung profitiert die Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung von der Einführung virtueller Welten, da diese die Durchführung von Experimenten ermöglichen, die zuvor an einem zu hohen Aufwand an Zeit, Geld und Material gescheitert waren. Eine besonders wertvolle Eigenschaft virtueller Welten ist die Möglichkeit der Darstellung und Interaktion mit realistisch erscheinenden Szenen unter gut kontrollierten Laborbedingungen. Im Vergleich zu den bisher verfügbaren Labor-Versuchsumgebungen erlauben virtueller Welten eine systematische Untersuchung von Wahrnehmung- und Verhalten unter ökologisch relevanten Bedingungen.

Auf der anderen Seite ist die Verwendung von Wissen und Methoden der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung unabdingbar für die Anwendbarkeit virtueller Welten. Bis dato muss sich der Wahrnehmungs- und Verhaltensapparat des Menschen zumeist an die Eigenschaften der Schnittstellen virtueller Welten anpassen. Eine effiziente Verwendung virtueller Welten ist aber nur möglich, wenn die Schnittstelle virtueller Welten an die Eigenschaften des Wahrnehmungs- und Verhaltensapparates des Menschen angepasst ist. Insgesamt gesehen ist es wichtig zu erkennen, dass die erfolgreiche Anwendung, aber auch die Entwicklung virtueller Welten die Beteiligung von Experten unterschiedlichster Fachgebiete bei der Bearbeitung von Projekten erfordert.

Aufgrund des quasi-realen Charakters der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten können weder die Erkenntnisse der *Ergonomie* noch die Definition der Mensch-Maschine-Schnittstelle von Computern in der Desktop-Metapher ein theoretisches Grundgerüst für das Verständnis der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten bieten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden wir zeigen, dass Regelkreise, wie sie in der biologischen Kybernetik zur Beschreibung des Informationsflusses zwischen dem Menschen und seiner Umwelt verwendet werden, ein verständliches Werkzeug zur analytischen Beschreibung der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten bieten.

Die enge Beziehung zwischen Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung auf der einen Seite und virtueller Realität auf der anderen Seite illustrieren wir am Beispiel von drei experimental-psychologischen Untersuchungen. Unter Verwendung virtueller Welten haben wir in diesen Experimenten biologische und psychologische Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung

untersucht. Wie sich zeigt, können die Ergebnisse unserer Experimente gleichzeitig zur Verbesserung der Qualität virtueller Welten beitragen.

Gegenstand des ersten Experimentes war die Untersuchung der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in einer Fahrsimulation. Im Vergleich zu früheren Arbeiten haben wir unsere Versuche nicht in einer 2D, sondern in einer simulierten 3D-Umgebung durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass sowohl der Kontrast des Bildes, die Verteilung der Ortsfrequenzen, die Größe des Gesichtsfeldes als auch die Dichte von Objekten einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung ausüben. Unsere Ergebnisse deuten ferner auf eine Verarbeitung der Geschwindigkeitsinformation in zwei getrennten Kanälen – einem objekt-basierten und einem Kanal auf der Basis von Bewegungsdetektoren - hin. Bei gezielter Anwendung ermöglichen unsere Ergebnisse eine wesentliche Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung in Fahrsimulationen.

Die Fähigkeit des Menschen die objektive Geschwindigkeit (km/h) von bewegten Objekten (z.B. Auto) wahrnehmen zu können wird als Geschwindigkeitskonstanz bezeichnet. Vor allem methodische Schwierigkeiten haben bislang eine systematische Untersuchung dieser Wahrnehmungsleistung verhindert. Die Verwendung virtueller Welten erleichtert nicht nur die Durchführung von Experimenten zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz, sondern bietet im Vergleich zu früheren Versuchsumgebungen auch die Möglichkeit der Darstellung bekannter Objekte in realistisch erscheinenden Szenen. Vor allem letzteres erweist sich als besonders wichtig, denn unter diesen Bedingungen offenbart sich ein signifikanter Einfluss der Verwendung von Vorwissen – insbesondere über die Größe von bekannten Objekten - auf die Wahrnehmung ihrer objektiven Geschwindigkeit. Da frühere Modelle zur Erklärung der Geschwindigkeitskonstanz diesen wichtigen Sachverhalt nicht berücksichtigt haben, müssen die Grundlagen der Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit neu überdacht werden. Ähnlich wie im Fall des ersten Experimentes kann die gezielte Anwendung unserer Ergebnisse Entwicklern von virtuellen Welten helfen, trotz technischer Beschränkung eine gezielte Verbesserung des Erscheinungsbildes statischer und dynamischer Objekte erreichen zu können.

Im dritten Experiment führen wir am Beispiel eines Navigationsexperimentes ein Versuchsparadigma ein, das die Übertragbarkeit von Ergebnissen von Experimenten in virtuellen Welten zur Erklärung menschlichen Verhaltens in der natürlichen Umwelt gewährleistet. Kernstück des Paradigmas ist die vergleichende Untersuchung von Verhalten in virtuellen und realen Welten. Derartige, vergleichende Untersuchungen dienen gleichzeitig der Verbesserung virtueller Welten, da die Ergebnisse der natürlichen Umgebung einen Referenzwert bieten, den es gilt, in der virtuellen Welt zu erreichen. Sind die genauen Unterschiede im Verhalten zwischen virtueller und realer Welt bekannt, ist es nachfolgend einfacher gezielte Verbesserungen der virtuellen Welt vorzunehmen.

1 Überblick und Zusammenfassung der Arbeit

1.1 Wahrnehmung und Virtuelle Realität

In jüngster Zeit ist es durch rasante Entwicklungen in den Bereichen Supercomputer, 3D-Graphik, Präsentationstechnologie (CRT-Projektion, 3D-Audio), Computer-Peripherie und Mensch-Maschine-Schnittstellen¹ möglich geworden, komplexe, nahezu real erscheinende künstliche (virtuelle) Welten mit Echtzeit-Interaktion des Simulationsteilnehmers zu erzeugen. Rechnergestützte Anwendungen, die eine Echtzeit-Interaktion des Menschen mit „virtuellen Welten“ erlauben, werden unter dem Begriff „Virtuelle Realität“ (Virtual Reality, VR) zusammengefasst.

1.1.1 Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung²

Im Vergleich zur natürlichen Umwelt erleichtern virtuelle Welten eine gezielte Veränderung ihrer Zustandsbedingungen. Beispielsweise kann das Erscheinungsbild eines Straßenzuges einer virtuellen Stadt in Sekundenbruchteilen verändert werden. Damit bieten virtuelle Welten dem Experimentalpsychologen eine ideale Versuchsumgebung, um Wahrnehmung und Verhalten des Menschen in realistisch erscheinenden, aber dennoch gut kontrollierbaren Umwelten zu untersuchen (siehe auch Bülthoff, Mallot, Foese-Mallot, 1997; Peruch, Gaunet, 1998; Distler, Van Veen, Braun, Bülthoff, Franz, Heinz, 1998; Bülthoff, Van Veen, 1999). Die Einführung virtueller Welten ermöglicht des weiteren die Durchführung von Experimenten zur Untersuchungen komplexer Wahrnehmungsleistungen, die bislang zumeist an einem zu hohen Aufwand an Zeit, Material und Kosten gescheitert waren. Insgesamt gesehen nehmen virtuelle Welten bei der Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung eine Mittelstellung zwischen dem traditionellen Psychophysik³-Labor sowie der natürlichen Umwelt ein. Im Psychophysik-Labor werden unter Verwendung einfacher Reize grundlegende Eigenschaften der Informationsverarbeitung des Menschen unter sehr gut kontrollierbaren experimentellen Bedingungen untersucht. Im Vergleich hierzu bietet die natürliche Umwelt das gesamte Spektrum aller möglichen Stimulationen der Sinnesorgane, von Nachteil ist jedoch die geringe Kontrolle des Versuchsleiters über die experimentellen Bedingungen. Virtuelle Welten erlauben im Vergleich zu traditionellen Labor-Versuchsumgebungen die Durchführung von Experimenten unter ökologischen relevanten Bedingungen unter – und dies steht im Gegensatz zur Durchführung von Experimenten in der natürlichen Umwelt - gut kontrollierten Laborbedingungen.

¹ Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle liegt immer dann vor, wenn zielgerichtetes menschliches Handeln und Wahrnehmen mit der Benutzung eines technischen Systems verbunden sind.

² Zur sprachlichen Vereinfachung wird im weiteren Verlauf anstelle der Formulierung „Wahrnehmung und Verhalten“ zumeist nur der Begriff „Wahrnehmung“ verwendet.

³ Die Psychophysik untersucht die Wahrnehmung von Lebewesen unter Verwendung von Methoden, die das Herstellen einer quantitativen Beziehung zwischen den physikalischen Eigenschaften eines Reizes und der Wahrnehmung der Versuchsperson erlauben.

Virtuelle Welten sind als Ergänzung zu den verfügbaren Versuchsumgebungen zu betrachten und sollen diese in keiner Weise ersetzen. Eine umfassende Erforschung der Wahrnehmung des Menschen ist nur durch den wohl durchdachten Einsatz aller drei Versuchsumgebungen möglich. Je nach Situation wird sich die eine oder andere Versuchsumgebung besser zur Untersuchung einer spezifischen Fragestellung eignen.

1.1.2 Virtuelle Realität

Das Verhältnis zwischen Wahrnehmungsforschung und virtuellen Welten ist nicht nur einseitig zu sehen, sondern der gezielte Einsatz von Wissen und Methoden der Wahrnehmungsforschung leistet einen wertvollen Beitrag bei der Entwicklung wahrnehmungsgerechter virtueller Welten. Sicherlich wurden entscheidende Verbesserungen von VR-Anwendungen erst durch die enormen technischen Fortschritte der letzten Jahre möglich. Allerdings lag und liegt der Schwerpunkt der Weiterentwicklung der Technologie zu sehr auf der Verbesserung reiner Leistungsdaten, wie beispielsweise der Zahl der pro Sekunde gezeichneten Polygone in der Computer-Graphik. Aufgrund dieser zum Teil sehr einseitigen Vorgehensweise ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten häufig nicht auf die Bedürfnisse und Ansprüche des Wahrnehmungs- und Verhaltensapparates des Menschen abgestimmt, sondern umgekehrt, der Wahrnehmungs- und Verhaltensapparat des Menschen muss sich auf die Gegebenheiten virtueller Welten einstellen. Unter diesen Bedingungen entwickeln Simulationsteilnehmer vergleichsweise häufig Symptome der Simulationskrankheit (Biocca, 1992; Kolasinski, 1995; Kennedy, Lanham, Drexler, Massey, Lilienthal, 1997), verlieren ihre Orientierung in der virtuellen Welt (Darken, Sibert, 1996a; Darken, Sibert, 1996b;) oder sind ganz einfach nicht in der Lage, sinnvoll mit virtuellen Welten zu interagieren. Unserer Ansicht nach sind diese Schwächen der Mensch-Maschine-Schnittstelle ein Hauptgrund dafür, dass bis heute nur vergleichsweise wenige Anwendungen virtueller Welten realisiert worden sind.⁴ Anhand eines biokybernetischen Modells zum Informationsfluss zwischen Mensch und Umwelt veranschaulichen wir, wo bei der Entwicklung und beim Betrieb virtueller Welten kritische Stellen im Informationsfluss liegen. Die einführende Darstellung des Informationsflusses wird eindeutig zeigen, weshalb ein genaues Verständnis der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten unabdingbar für die Anwendbarkeit von VR ist.

⁴ Laut Brooks (Brooks, 1999) gibt es ca. 10-100 Anwendungen, die über den Status einer „Demo-Anwendung“ oder eines Prototypen hinaus gewachsen sind, wobei weder Fahrzeug- noch Entertainment-Simulatoren in diese Einschätzung einbezogen wurden. Im Vergleich zu 1994 (Brooks, 1994) stellt dies zwar eine signifikante Steigerung dar, betrachtet man sich jedoch die Anwendungen genauer, so fallen zwei Aspekte besonders ins Auge. Die Implementierungen sind nach wie vor sehr kostspielig und erfordern zudem erhebliches Fein-Tuning. Der interaktive Charakter der Applikationen konzentriert sich vorwiegend auf die Ausgabe- und nicht auf die Eingabeseite.

1.1.3 Grundlage gemeinsamer Experimente

Bei Wahrnehmungsexperimenten zum Zweck der Grundlagenforschung und Experimenten mit dem Ziel der Verbesserung virtueller Welten handelt es sich keineswegs um zwei verschiedene Aspekte. Oft genügen schon kleine Änderungen der Fragestellung und/oder der Methode, um sowohl die Interessen des Grundlagenforschers als auch jene des Entwicklers virtueller Welten zufrieden zu stellen. Anhand von drei experimentellen Fragestellungen werden wir grundlegende Themen der Wahrnehmung und des Verhaltens des Menschen bearbeiten. Die Ergebnisse dieser Experimente bieten einerseits neue Einblicke in die menschliche Informationsverarbeitung, andererseits leisten die Ergebnisse auch einen Beitrag zur einer gezielten Verbesserung der Qualität von VR-Anwendungen.

1.2 Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in Fahrsimulatoren

Ein häufig anzutreffender Schwachpunkt von VR-Fahrsimulatoren ist das Unterschätzen der Fahrgeschwindigkeit durch Simulationsteilnehmer. Vor allem bei Simulatoren, die zur Fahrausbildung eingesetzt werden kann eine solche Fehleinschätzung fatale Folgen haben, sofern die Fehleinschätzung von der virtuellen Welt auf die reale Fahrsituation übertragen wird. Um dieses Gefahrenpotential bei der Verwendung von Simulatoren zur Fahrausbildung zu mindern, ist eine gezielte Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung in Fahrsimulatoren notwendig. Eine systematische Vorgehensweise bei der Durchführung von Verbesserungen setzt jedoch das Verständnis der Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung voraus. In früheren Experimenten zur Untersuchung der Geschwindigkeitswahrnehmung wurde gefunden, dass eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit eines Musters sowohl durch Erhöhung seines Kontrastes, seiner Ortsfrequenz als auch seiner räumlichen Ausdehnung erreicht werden kann. Die betreffenden Experimente wurden unter Verwendung einfacher Reizmuster (2D, Sinus-Gitter, Punkte), die sich zudem in der Bildebene (2D) bewegten, durchgeführt. Durch die Eigenbewegung eines Beobachters in einer Fahrsimulation (3D) entstehen jedoch optische Flussmuster in der Bildebene (2D) des darstellenden Gerätes, deren Kontrast und deren Verteilung der Ortsfrequenzen schwieriger zu beschreiben sind. Inwieweit die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung auch bei Verwendung realistisch erscheinender Versuchsszenen in einer Fahrsimulation durch grundlegende Bildeigenschaften wie Kontrast und Ortsfrequenz beeinflusst wird, haben wir in einem ersten Teilexperiment untersucht. Die Ergebnisse zeigen ähnlich wie in früheren Untersuchungen eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei einer Erhöhung des Kontrastes und des Anteils hoher räumlicher Frequenzen. Die Ergebnisse unseres zweiten Teilexperimentes zeigen eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei zunehmender Größe des Gesichtsfeldes. Beide Ergebnisse zeigen, dass die

Wahrnehmung der Geschwindigkeit auch in realistisch erscheinenden Szenen durch grundlegende Bildeigenschaften beeinflusst wird, d.h. auch bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung spielen frühe Verarbeitungsstufen eine entscheidende Rolle.

Alternativ zur Verwendung von Bewegungsdetektoren in den frühen Stufen der Informationsverarbeitung könnte die Bestimmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung durch Messung des pro Zeiteinheit zurückgelegten Weges unter Zuhilfenahme der relativen Position eindeutig erkannter Objekte im Gesichtsfeld erfolgen. Die Anwendung dieser Strategie erfordert zunächst eine Segmentierung der Szene bzw. die Erkennung von Objekten, womit die Bestimmung der Geschwindigkeit unter diesen Bedingungen zu einem relativ späten Zeitpunkt in der Informationsverarbeitung stattfinden würde. Anstelle des zurückgelegten Weges könnte auch die Frequenz der vorbei gleitenden Objekte zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung verwendet werden. In diesem Fall sollte die wahrgenommene Geschwindigkeit mit Objektdichte in der Szene korrelieren.⁵ Tatsächlich wird diese Vermutung durch die Ergebnisse unseres dritten Telexperimentes - das den Einfluss der Dichte von Objekten auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung untersucht hat – bestätigt.

Zusammenfassend lassen unsere Ergebnisse darauf schließen, dass das visuelle Systeme zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in einer realen Szene gleichzeitig auf die Auswertung von objektbasierten Informationen – sofern diese im ausreichendem Maß vorhanden sind – und die Auswertung der Informationen der primären Bewegungsdetektoren zurückgreift. Die Redundanz der informationsverarbeitenden Prozesse erklären wir uns durch die hohe Variabilität der Umweltbedingungen. Bei Fahrten im Nebel (Snowden, Stimpson, Ruddle, 1998) oder bei Dunkelheit (Gegenfurtner, Mayser, Sharpe, 1999)⁶ kommt es zu einer sehr starken Einschränkung der Verfügbarkeit von Objektinformationen. Trotzdem sind wir unter diesen Bedingungen, wenn auch mit Einschränkungen, in der Lage die Geschwindigkeit der Eigenbewegung verhältnismäßig genau zu bestimmen. Allerdings weisen die Unfallstatistiken unter schlechten Sichtbedingungen⁷ auch auf die Wichtigkeit der Verfügbarkeit beider Informationstypen bei der Wahrnehmung der Eigengeschwindigkeit in einer Fahrsituation hin.

Für Entwickler virtueller Welten bedeuten unsere Ergebnisse, dass ihnen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um die wahrgenommene Fahrgeschwindigkeit zu verbessern. Je nach Anwendung, Budget, Personal und Zeitrahmen kann sich die Verwendung der einen oder anderen

⁵ Bei Verwendung eines „Frequenzzählers“ führt eine Zunahme der Objektdichte bei gleichbleibender Geschwindigkeit zu einer Frequenzzunahme. Bei dem vorliegenden Frequenzzähler handelt es sich um die Auswertung zeitlicher Frequenzen in einer relativ späten Stufe der Informationsverarbeitung.

⁶ Gegenfurtner et al. (1999) haben ihre Experimente unter Verwendung von Sinusstreifenmustern durchgeführt. Derzeit befinden sich in unserem Labor Nachtfahreperimente in einer Fahrsimulation in Vorbereitung.

Möglichkeit (Erhöhung des Kontrastes, Manipulation der Verteilung der räumlichen Frequenzen durch Bearbeitung von Texturen, Erweitern des Gesichtsfeldes, Positionieren von Objekten) als vorteilhaft erweisen.

1.3 Geschwindigkeitskonstanz

Während bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung das gesamte Gesichtsfeld Bewegungsinformationen bietet, beschränkt sich die Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit von Objekten (z.B. Auto) auf das lokale Umfeld des Objektes. Im Zusammenhang mit der Wahrnehmung der Geschwindigkeit von bewegten Objekten ist bemerkenswert, dass wir unabhängig von der Entfernung der Gegenstände in der Lage sind, deren objektive Geschwindigkeit („=km/h“) korrekt einzuschätzen. Diese unter dem Begriff Geschwindigkeitskonstanz zusammengefasste Fähigkeit des Menschen ist keine Selbstverständlichkeit, da auf der Netzhaut des Auges nur Informationen über die Winkelgeschwindigkeit (2D) von Objekten (z.B. Auto) vorliegen. Kennzeichnend für die Winkelgeschwindigkeit ist aber, dass sie sich umgekehrt proportional zur Entfernung des bewegten Objektes verhält. Die objektive, entfernungs-unabhängige Geschwindigkeit des bewegten Objektes muss folglich durch die Kombination der Winkelgeschwindigkeit mit zusätzlichen Informationen (z.B. Entfernung) rekonstruiert werden.

In der Literatur finden sich zum Thema Geschwindigkeitskonstanz nur sehr wenige Arbeiten. Zudem unterscheiden sich die Ergebnisse bzw. die Interpretationen dieser Arbeiten zum Teil erheblich. Auffallend ist jedoch die Eindeutigkeit mit der eine jede dieser Studien für sich betrachtet die Frage beantwortet, ob zum Erreichen der Geschwindigkeitskonstanz die Kenntnis der Entfernung eines Objektes zwingend notwendig ist. Die Akzeptanz bzw. das Zurückweisen der Hypothese halten sich dabei die Waage. Wir nehmen an, dass die Eindeutigkeit der Aussagen innerhalb der einzelnen Studien zum Teil durch die experimentellen Paradigmen sowie die vergleichsweise informationsarmen Reize bedingt war. Ähnlich wie in unserem ersten Experiment lag auch hier der Ausgangspunkt unserer Untersuchungen darin, eine bekannte Fragestellung unter realistischeren Bedingungen zu untersuchen. Die Ergebnisse unserer Experimente weisen auf einen dominanten Einfluss der bekannten Größe von Objekten auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit hin. Die Größe von Objekten war bereits in früheren Untersuchungen ein zentrales Thema, wobei in diesen Experimenten die relative bzw. absolute, und nicht die bekannte Größe von Objekten zur Diskussion stand. Der dominante Einfluss der bekannten Größe von Objekten auf die wahrgenommene (objektive) Geschwindigkeit ist ein Indiz für die Verwendung von Vorwissen bei der Wahrnehmung ihrer

⁷ Sicherlich wird durch schlechte Sichtbedingungen auch die Bestimmung der „Time-to-Contact“ entscheidend beeinflusst. Die Erfahrung zeigt aber auch, daß selbst erfahrene Fahrer unter schlechten Sichtbedingungen ihre Fahrgeschwindigkeit unterschätzen.

objektiven Geschwindigkeit. Entscheidender Vorteil der Verwendung von Vorwissen ist, dass nur ein kleiner Teil der Informationen einer Szene gezielt ausgewertet werden muss, während weitergehende Informationen der Szene zur Fein-Kalibration der wahrgenommenen Geschwindigkeit verwendet werden können. Inwieweit das visuelle System parallel hierzu die zeitliche Frequenz zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit auswertet, kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht eindeutig ausgesagt werden. Eine Zunahme der Größe des Objektes (= Abnahme der räumlichen Frequenz) wirkt sich bei gleichbleibender Geschwindigkeit des Objektes umgekehrt proportional auf die zeitliche Frequenz aus und führt deshalb zu einer Abnahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit. Insgesamt war in unseren Experimenten augenfällig, dass die Versuchspersonen selbst bei Verfügbarkeit eines Minimums an dargestellter Information noch in der Lage waren, eine gute Abschätzung der Geschwindigkeit von unterschiedlich weit entfernten Objekten zu liefern. Aus der Vielzahl der von uns untersuchten Entfernungshinweise hatte nur Manipulationen der Objektgröße einen äußerst signifikanten Effekt auf die wahrgenommene Geschwindigkeit. Eine Zunahme der Größe des Objektes führt zu einer Abnahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit des Objektes und umgekehrt. Ob sich die Größe der Objekte über die zeitliche Frequenz oder die wahrgenommene Entfernung auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit auswirkt ist jedoch unklar. Bemerkenswert ist des Weiteren, dass sich in unseren Experimenten ein synergetischer Effekt von Bewegungsparallaxe und stereoskopischer Darstellung gezeigt hat.

In VR-Anwendungen kann die Umsetzung unserer Ergebnisse zu einer Verbesserung der Qualität der räumlichen Darstellung sowie der Qualität der Darstellung von Bewegungen im Raum beitragen. Durch eine gezielte Manipulation der Eigenschaften - vor allem der Größe - und des Erscheinungsbildes von virtuellen Objekten kann, trotz technischer Beschränkungen von VR-Systemen hinsichtlich der Darstellung räumlicher Tiefe, eine Verbesserung statischer sowie dynamischer Raumeindrücke erreicht werden.

1.4 Navigation in realen und virtuellen Welten

Bei der Interpretation der Ergebnisse von Verhaltensexperimenten, die in virtuellen Welten durchgeführt wurden, stellt sich zwangsläufig die Frage, inwieweit die Ergebnisse und deren Interpretation zur Erklärung des Verhaltens in der natürlichen Umwelt herangezogen werden können. Am Beispiel eines Navigationsexperimentes werden wir ein experimentelles Paradigma zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse vorstellen. Grundlage des Paradigmas ist die parallele Durchführung eines Experimentes in der realen und der virtuellen Welt. Finden sich keine Unterschiede in den Verhaltensleistungen der Versuchspersonen, so können nachfolgende Experimente zur Untersuchung der spezifischen Fragestellung in der virtuellen Welt durchgeführt werden. Ergeben sich Unterschiede im Verhalten zwischen der virtuellen und realen Welt, muss der

Versuchsleiter zunächst herausfinden, wodurch diese Unterschiede bedingt werden. Je nach Situation hat nachfolgend entweder eine entsprechende Anpassung der virtuellen Welt zu erfolgen oder, bei der Interpretation der Ergebnisse der Experimente muss dem Unterschied entsprechend Rechnung getragen werden.

Das hier vorgestellte experimentelle Paradigma kommt auch bei der Entwicklung virtueller Welten zur Anwendung. In jüngster Zeit wird VR vermehrt eingesetzt, um Personen mit unbekanntem Gelände vertraut zu machen. Die Person erwerben räumliches Wissen in VR, welches nachfolgend die Orientierung in der entsprechenden natürlichen Umgebung erleichtern soll. Zum Test der Effizienz des VR-Trainings wird das Navigationsverhalten von Versuchspersonen in der virtuellen und der realen Welt verglichen. Unterschiede im Verhalten können gezielte Hinweise geben, welche Aspekte der virtuellen Welt zu verbessern sind.

1.5 Fazit

Die Beziehung zwischen Wahrnehmungsforschung und virtuellen Welten ist *zweiseitig*. Die Verwendung virtueller Welten ermöglicht Wahrnehmungs- und Verhaltensforschern die Bearbeitung ihrer Fragestellungen unter „*ökologisch relevanten*“ Bedingungen bei gleichzeitig guter Kontrolle der experimentellen Situation. Im Gegenzug können die Ergebnisse von Wahrnehmungsuntersuchungen in virtuellen Welten sowie Wissen und Methoden der Wahrnehmungsforschung im allgemeinen zur *gezielten Verbesserung virtueller Welten* eingesetzt werden.

1.6 Wegweiser

Wir werden die Arbeit mit einer allgemeinen Betrachtung der zweiseitigen Beziehung zwischen Wahrnehmungsforschung und virtuellen Welten beginnen. Dabei werden wir zunächst auf die Perspektiven, die virtuelle Welten der Wahrnehmungsforschung bieten eingehen. Es folgt die Diskussion der Bedeutung der Wahrnehmungsforschung, aber auch der biologischen Kybernetik bei der Planung und beim Aufbau von virtuellen Welten und Simulationsanlagen.

Nach der Einführung des Versuchsaufbaus folgt die Beschreibung und Diskussion unserer Experimente zur Untersuchung der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung, der Geschwindigkeitskonstanz und der Navigation in realen und virtuellen Welten.

Abschließend schildern wir in Anhang A in allgemeiner Form und an einem konkreten Beispiel, wie wir in unserem Labor Wissen und Methoden der Wahrnehmungsforschung in den Aufbau von drei Generationen einer VR-Simulationsanlage einbezogen haben.

Anmerkung

Bereits im Überblick wurden die Begriffe „Virtuelle Welt“ und „Virtuelle Realität“ synonym verwendet. Diese Vorgehensweise werden wir auch im weiteren Verlauf der Arbeit beibehalten. Auf den Begriff „Virtuelle Realität“ greifen wir vorwiegend aus historischen Gründen zurück. Nach Möglichkeit haben wir die Verwendung dieses Begriffes vermieden, da die herkömmliche Interpretation des Ausdrucks „Realität“ zu einer falschen Erwartungshaltung gegenüber virtuellen Welten führt.

2 Verwendung virtueller Welten zur Untersuchung menschlicher Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen

2.1 Traditionelle Wahrnehmungsforschung

Fortschritte in der experimentellen Untersuchung menschlicher Wahrnehmungsleistungen waren und sind sehr eng verknüpft mit Weiterentwicklungen der zur Untersuchung verwendeten Methodik und Technologie. Mussten Forscher zu Beginn des Jahrhunderts ihre Reizmuster noch auf Papier zeichnen, bzw. reale Objekte verwenden, so wurde es durch die Einführung von CRT-Displays und 2D Computer-Graphik möglich, neue, zumeist sehr einfache Reizmuster (Linien, Punkte, Sinusstreifenmuster, siehe Abb. 1) in kürzester Zeit zu generieren und zu manipulieren. Mit Hilfe dieser einfachen Reizmuster gelang es, grundlegende Mechanismen der Arbeitsweise unseres Gehirns aufzudecken. Fraglich jedoch ist, ob mit diesen, unter vereinfachten Bedingungen gefundenen Mechanismen auch menschliche Wahrnehmungsleistungen in komplexen Umwelten verstanden werden können. Die Klärung dieser Frage gestaltete sich bisher als sehr schwierig, da Verhaltensexperimente in komplexen Umgebungen aufgrund fehlender Technologie und mangelnder Kontrolle der Versuchsumgebung (natürliche Umwelt) nicht möglich waren.

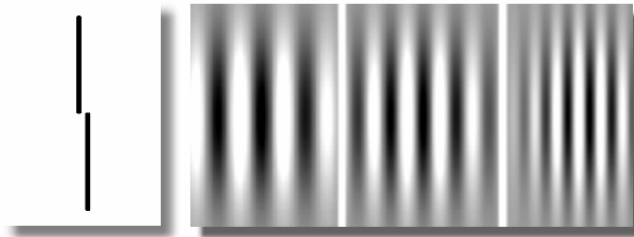


Abb. 1 Typische Reizmuster wie sie in traditionellen psychophysischen Versuchen zur Untersuchung der visuellen Wahrnehmung eingesetzt wurden und werden. *Links*: Linien zur Untersuchung der Nonius-Sehschärfe (Fahle, 1997) *Rechts*: Drei Sinusstreifenmuster mit zunehmender räumlicher Frequenz zur Untersuchung der Kontrastsensitivität und des räumlichen Auflösungsvermögens des visuellen Systems (Kelly, 1984).

Erst in jüngster Zeit ist es durch die Einführung virtueller Welten möglich geworden, komplexe, nahezu real erscheinende künstliche Welten mit Echtzeit-Interaktion des Simulationsteilnehmers zu erzeugen. Virtuelle Welten stellen aus mehreren Gründen eine geeignete Versuchsumgebung zur Untersuchung von Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen, wie Raumwahrnehmung, Navigation und Szenenerkennung dar. Unter Einbeziehung virtueller Welten stehen dem Experimental-Psychologen⁸ mit dem traditionellen Psychophysik-Labor, den virtuellen Welten und der natürlichen Umwelt drei Umgebungen zur Untersuchung der Wahrnehmung und des Verhaltens zur Verfügung. Virtuelle Welten sind deshalb so interessant, weil sie eine bis dato bestehende Lücke ausfüllen, indem sie eine Mittelstellung zwischen dem traditionellen Psychophysik-Labor und der natürlichen Umwelt

⁸ Der Begriff „Experimental-Psychologe“ steht hier stellvertretend für Wissenschaftler aller Fachbereiche, die sich experimentell und nicht-invasiv mit der Wahrnehmung und dem Verhalten des Menschen beschäftigen.

einnehmen. Sie ermöglichen die Untersuchung von Wahrnehmung und Verhalten in realistisch erscheinenden simulierten Umwelten unter kontrollierten Laborbedingungen.

2.2 Vergleichende Betrachtung von Versuchsumgebungen

2.2.1 Anforderungen an die Versuchsumgebung

Die Anforderungen an eine Versuchsumgebung zur Untersuchung komplexer Wahrnehmungsleistungen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Auf der einen Seite stehen Anforderungen an die im Versuch dargestellte Umwelt und die bei der Interaktion der Versuchsperson mit dieser Umwelt verwendeten Metaphern. Diesen gegenüber stehen Anforderungen an das experimentelle Design, die eine Versuchsumgebung aus experimental-psychologischer Sicht charakterisieren.

Anforderungen an die (simulierte) Umwelt

- Erzeugen und Darstellen komplexer Szenen, wie z.B. Innenräume, Städte und Landschaften
- Stimulation mehrerer Sinnesmodalitäten wie Sehen, Hören und Tasten
- Interaktion des Versuchsteilnehmers mit der Versuchsumgebung - Handlungen der Versuchspersonen müssen zu entsprechenden Änderungen in der Versuchsumwelt führen.
- Bei Laborumgebungen und virtuellen Welten: Geeignete Medien zur Stimulation der Sinnesorgane des Simulationsteilnehmers (Head-Mounted-Display, CRT-Displays, CRT-Projektoren, 3D Audio-Synthesizer, Bewegungsplattform, Bodysuits, etc.).

Anforderungen an das experimentelle Design

- Beschreibbarkeit der experimentellen Bedingungen - essentiell für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse
- Systematische Kontrolle über Versuchsparameter (Vertauschen von Objekten, Änderung von Objekteigenschaften, wie z.B. Größe)
- Messung des Verhaltens bzw. der Leistung der Versuchsperson durch Reaktionszeitmessung, Aufzeichnung der Trajektorien der Versuchspersonen oder Aufzeichnung des Antwortverhaltens der Versuchsperson.

2.2.2 Anforderungen an die Umwelt

Wie der Vergleich der Versuchsumgebungen hinsichtlich der dargestellten Umwelt zeigt, stellt die natürliche Umwelt für alle Anforderungen in diesem Bereich die optimale Lösung dar. Sie bietet Umwelten unterschiedlichster Komplexität von Wüsten über Landschaften bis hin zu Städten. Alle

Sinnesorgane des Menschen werden in "natürlicher Weise" stimuliert und den Versuchspersonen steht das gesamte Spektrum an Interaktionsmöglichkeiten mit der Umwelt zur Verfügung. Dies ist von großer Bedeutung, da bereits Gibson (1962, 1966, 1979) erste Hinweise gefunden hat, dass man bei der Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung diese nicht isoliert vom Verhalten (Handlung) betrachten kann. In der Terminologie der biologischen Kybernetik (Wiener, 1948) handelt es sich hierbei um einen geschlossenen Regelkreis (Abb. 2b). Im Gegensatz hierzu beschränken sich traditionelle Laborumgebungen auf die Simulation sehr einfacher, zumeist isolierter Reize. In den seltensten Fällen wird dabei mehr als ein Sinnesorgan gleichzeitig stimuliert. Zur besseren Kontrolle der experimentellen Bedingungen wird der Regelkreis geöffnet (Abb. 2a), d.h. die Versuchsperson interagieren nicht direkt mit der im Versuch präsentierten Umwelt.

Virtuelle Welten nehmen eine Mittelstellung ein, da sie die Darstellung komplexer Szenen bei gleichzeitiger Echtzeit-Interaktion der Versuchsperson erlauben (geschlossener Regelkreis). Allerdings handelt es sich bei den dargestellten Szenen in der Regel um kein genaues Abbild der natürlichen Umwelt, sondern die simulierten Szenen stellen zumeist eine vereinfachte Nachbildung der natürlichen Umwelt dar. Je nach Komplexität der verwendeten Simulationsanlage können ein bis mehrere Sinnesorgane des Menschen gleichzeitig stimuliert werden.

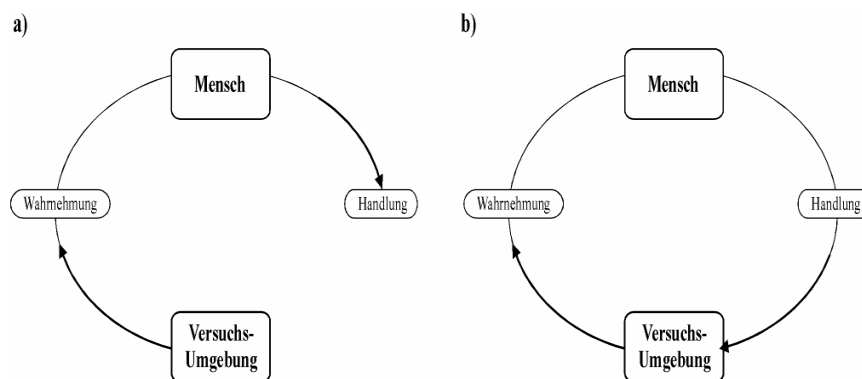


Abb. 2 Schematische Darstellung des offenen (a) und geschlossenen (b) Regelkreises. Im offenen Regelkreis wird der kontinuierliche Informationsfluss zwischen dem Menschen und der Umwelt unterbrochen.

2.2.3 Anforderungen an das experimentelle Design

Um Wahrnehmung und Verhalten des Menschen systematisch untersuchen zu können, muss eine genaue Beschreibung und Kontrolle der Versuchsbedingungen gewährleistet sein. Nur so kann ein Versuch mehrmals unter identischen Bedingungen wiederholt werden. Die Versuchsumgebung sollte ferner die Möglichkeit zur einfachen, schnellen und gezielten Veränderung der untersuchten Attribute eines Reizes bieten. Die Interpretation des Verhaltens oder der Leistung der Versuchsperson setzt

voraus, dass das Verhalten der Versuchsperson aufgezeichnet bzw. gemessen werden kann.

Traditionelle Labor-Versuchsumgebungen erfüllen die genannten Anforderungen sehr gut. Die Versuchsbedingungen und die Attribute des Reizmusters können genau beschrieben und kontrolliert werden. Systematische Änderungen des Reizmusters sind aufgrund seiner Einfachheit leicht durchzuführen. Dagegen ist in der natürlichen Umwelt eine genaue Beschreibung und Kontrolle der Versuchsbedingungen, die eine Wiederholung des Versuches unter den genau gleichen Bedingungen erlauben, nur sehr selten möglich. Beispielsweise sind die Beleuchtungsbedingungen einer Szene ein schwer zu kontrollierender Faktor, da sie sich entsprechend der Witterungsbedingungen und in Abhängigkeit von der Tageszeit ständig ändern. Die Möglichkeit Versuchsbedingungen, Objekte oder deren Eigenschaften systematisch zu verändern, ist in der natürlichen Umwelt nur bis zu einer gewissen Komplexität und Größe der Objekte möglich. Die Versuchsbedingungen virtueller Welten sind zwar nicht so exakt beschreib- und kontrollierbar wie in traditionellen Laborumgebungen, aber im Vergleich zur natürlichen Umwelt hat der Versuchsleiter eine wesentlich bessere Kontrolle über die Versuchsbedingungen. Vor allem die Möglichkeit, Manipulationen wie das Entfernen oder Verschieben von größeren Gegenständen einfach durchführen zu können, ist ein besonderes Kennzeichen virtueller Welten (siehe Abschnitt 2.3).

Traditionelle Versuchsumgebungen und virtuelle Welten haben ferner den Vorteil, dass die Messung der Leistung bzw. des Verhaltens der Versuchsperson aufgrund der verwendeten Technologie zumeist kein Problem darstellt. Beide Umgebungen erleichtern vor allem die Synchronisation zwischen dem Antwortverhalten der Versuchsperson (Tastendruck, simulierte Fortbewegung, etc.) und den „Zustandsbedingungen“ der simulierten Umwelt.

2.2.4 Zusammenfassung

Virtuelle Welten zwar weder hinsichtlich „Umweltbedingungen“ noch bezüglich des experimental-psychologischen Designs eine optimale Lösung dar, aber in der Summe der Eigenschaften zeigt sich das große Potential virtueller Welten als Versuchsumgebung. Virtuelle Welten stellen somit eine äußerst wertvolle Ergänzung bisher verfügbarer Versuchsumgebungen dar.

2.3 Vorteile virtueller Welten in der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung

Wie bereits mehrfach erwähnt wurde, ermöglichen virtuelle Welten die Durchführung von Veränderungen der simulierten Umwelt, die in der natürlichen Umwelt nur schwer bzw. nicht zu erreichen sind. Da dieses Potential einen Eckpfeiler der Verwendung virtueller Welten in der Wahrnehmungsforschung darstellt, wollen wir diesen Sachverhalt an einigen Beispielen illustrieren.

- Virtuelle Welten ermöglichen es dem Versuchsleiter Umwelten verschiedenster Komplexität wie Gebäude, Städte oder Landschaften zu simulieren. Auf diesem Wege wird es dem Benutzer

möglich innerhalb eines Labors mit Großfeldumgebungen zu interagieren. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass der Versuchsleiter in virtuellen Welten innerhalb eines Wimpernschlages von einer auf eine andere Welt umzuschalten kann.

- Eigenschaften der Objekte einer Szene können einfach, schnell und gezielt verändert werden. Beispielsweise ist es sehr einfach, die Größe und Form eines Fahrzeuges zu verändern. Ein derartiger Eingriff wäre in der realen Welt mit hohen Kosten verbunden (mehrere Fahrzeuge). In Navigationsexperimenten ist es möglich die Farbe, Form, Größe, Textur, Position und Orientierung von großen Objekten wie beispielsweise Häusern zu verändern. Häuser können aus der Szene entfernt bzw. zur Szene hinzugefügt werden, der Verlauf von Straßenzügen kann problemlos verändert werden. Alle genannten Veränderungen können in der natürlichen Umwelt nur mit einem sehr hohen Aufwand erreicht werden.
- Im Gegensatz zu herkömmlichen Versuchsplattformen erleichtern virtuelle Welten die Simulation mehrerer Sinneseindrücke. Gerade die „höheren Verhaltensleistungen“ basieren auf der Integration von Informationen aus unterschiedlichen Sinneskanälen. Im Gegensatz zur realen Welt bieten virtuelle Welten bei multi-sensorischer Stimulation eine bessere Kontrolle über die Versuchsbedingungen. Da die Signale im Computer generiert werden, stehen dem Versuchsleiter genaue Informationen über die Eigenschaften der Signale zur Verfügung. Dies wiederum ist eine unabdingbare Voraussetzung, wenn ein Zusammenhang zwischen der Verhaltensleistung und den Eigenschaften der Umwelt hergestellt werden soll.

2.4 „Virtuelle Wahrnehmungsforschung“

In einem „Guest Editorial“ in Perception hat Koenderink (1999) große Bedenken hinsichtlich der Verwendung von Computer-Graphik in der Psychophysik geäußert. Wie viele andere Wissenschaftler erkennt Koenderink das Potential der neuen Technologien zur Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung an. Die „neue Technologie“ fördere aber auch die Möglichkeit, Experimente mit einem vergleichsweise geringen Aufwand implementieren und durchführen zu können. Die „mangelnde Beschäftigung mit dem Versuchsaufbau“ birgt laut Koenderink die Gefahr, dass Versuchsleiter bei der Interpretation ihrer Ergebnisse nicht mehr in der Lage sind zwischen Artefakten der Versuchsumgebung und „generischen“ Wahrnehmungsleistungen zu unterscheiden. Auf diesem Wege würde eine neue Disziplin - eine „virtuelle Psychophysik“ – entstehen; das Messen von Wahrnehmungsleistungen in Computer-Graphik-Umgebungen. Im Gegensatz zu Bühlhoff & Van Veen (1999) teilen wir diese Bedenken bis zu einem gewissen Grad. Besonders bei der Untersuchung isolierter Sinnesleistungen sind in den letzten Jahren die Voraussetzungen für eine Implementierung von Versuchen durch Laien gegeben worden. Die Gefahren liegen nicht nur in der verwendeten

Technologie, sondern vor allem darin, dass Forschung nicht länger eine Profession, sondern ein Beruf mit Karrierezwang geworden ist.

Was die Verwendung virtueller Welten (ein weiter Schritt von der reinen Computer-Graphik) betrifft, behaupten wir, dass der Betrieb von VR-Anlagen nicht möglich ist, ohne sich mit den Mängeln der Technologie auseinander zusetzen. Sicherlich führt die Komplexität der Anlagen dazu, dass viele „Mängel“ nicht erkannt werden. Allerdings ist eine derartige Situation nicht Neues, denn die Einführung einer neuen Methode erfordert immer das Sammeln von Erfahrungen. Nicht alle Artefakte können durch theoretische Überlegungen ausgeschlossen, sondern müssen „erfahren“ werden. Erst das Sammeln von Erfahrung ermöglicht eine gezielte Anpassung und Verbesserung einer Methode. Im Lauf der Zeit stellt sich zudem heraus, welche Fragestellungen mit einer bestimmten Methode bearbeitet werden können.

Der beeindruckende Labortisch in Koenderinks Artikel hat sicherlich nicht nur 1-2 Jahre Arbeit eines Doktoranden gekostet, sondern beinhaltet das Wissen einer gesamten wissenschaftlichen Kommune über Jahrzehnte. Eine „virtuelle Psychophysik“ oder in unserem Fall die „virtuelle Wahrnehmungsforschung“ beinhaltet nicht weniger und nicht mehr Gefahren als die frühere Einführungen neuer Technologien in der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung.

Koenderink's Beispiel der falschen Beleuchtungseffekte, die durch die Beschränkungen der Computer-Graphik und der darstellenden Geräte zustande kommen ist sicherlich korrekt. Nur kann man diese Situation auch aus einem anderen Blickwinkel sehen. Die Entwickler von Computerspielen sind trotz technischer Beschränkungen in der Lage durch die gezielte Manipulation von Beleuchtungseffekten – wobei die meisten der Manipulationen im Widerspruch zur Physik stehen - einen „realistischen Eindruck“ der Szene zu erzeugen. Unter der Voraussetzung, dass man sich der „fehlerhaften“ Physik der Szene bewusst ist, verbirgt sich hier eine sehr interessante Frage: „Warum erscheint die Szene so realistisch, obwohl die Physik der Darstellung nicht korrekt ist?“ Untersuchungen dieser und ähnlicher Fragestellungen können sicherlich wertvolle Hinweise über die Informationsverarbeitung des visuellen Systems unter „ökologisch relevanten Bedingungen“ liefern. Des weiteren sollten Computer-Bildschirme auch nicht länger als „nicht ökologisch relevant“ betrachtet werden, da bereits ein großer Teil der Bevölkerung mehrere Stunden pro Tag am Bildschirm verbringt.

3 Einführung in die Virtuelle Realität

3.1 Grundlagen Virtueller Welten

Die Einführung der „Virtuellen Realität“ hat in der Interaktion zwischen Mensch und Maschine ein neues Zeitalter eingeläutet. Bis vor wenigen Jahren waren Computer zumeist Mittel zum Zweck. Viele Aufgaben, die ohne Verwendung von Computern einen sehr hohen Aufwand an Personal und Zeit erfordert hätten, können und konnten mit Hilfe von Rechnern schnell und zuverlässig bearbeitet werden. Beispiele hierfür sind Büro-, Präsentations- und Verwaltungsanwendungen, die Analyse und Visualisierung komplexer, hochdimensionaler Datensätze in Medizin, Forschung und Wissenschaft sowie die Steuerung komplexer Anlagen in der Industrie. Diese Anwendungen zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Die Interaktion zwischen dem Benutzer und dem Rechner findet nur zu diskreten Zeitschritten statt, d.h. die Interaktion ist nicht kontinuierlich. Die Zeit zwischen der Aktion des Menschen und der Reaktion des Computers ist zumeist nicht kritisch für die Funktionalität der Anwendung. Da der Computer dem Menschen die Arbeit erleichtern soll, beschränken sich die Aktionen des Menschen auf ein Minimum.
- Die Eingabe der Daten erfolgt durch Tastatur und Maus.
- Die auf dem Monitor dargestellte Szene ist kein dynamisches Abbild der realen Umwelt.
- Die Darstellung der Szene beschränkt sich zumeist auf den visuellen Kanal.

Genau umgekehrt gestaltet sich die Situation in virtuellen Welten. Die künstliche Welt soll ein hinreichend genaues Abbild der realen Welt darstellen. Deswegen sollte die virtuelle Welt auch nicht nur visuell, sondern unter Verwendung anderer darstellender Systeme - beispielsweise Akustik- oder Bewegungssysteme – präsentiert werden. Die Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Welt muss ohne erkennbare Verzögerung erfolgen. Des weiteren sind ausgeklügelte Eingabegeräte notwendig, um die Aktionen des Benutzers entsprechend interpretieren zu können. Aus technischer Sicht ist die Implementierung dieser grundlegenden Anforderungen virtueller Welten aus mehreren Gründen problematisch. Zwar ermöglichen Radiosity-Rendering-Techniken das Erzeugen photorealistischer Szenen, doch in Abhängigkeit von der Komplexität der Szene, der Anzahl und dem Typ der Beleuchtungsquellen sowie der zur Verfügung stehenden Rechenleistung dauert die Berechnung eines Bildes zumeist mehrere Stunden. VR-Anwendungen erfordern hingegen, dass eine neue Szene innerhalb weniger Millisekunden berechnet und dargestellt werden kann. Möglich wird dies nur durch Verwendung schneller Rendering-Verfahren. Allerdings haben so erzeugte Szenen ein weit weniger realistisches Erscheinungsbild. Zum Erreichen der Echtzeit-Berechnung⁹ einer Szene muss ein

⁹ Im Rahmen dieser Arbeit wird unter Echtzeit das Erreichen einer Bildwiederholrate von mindestens 30 Hz verstanden.

Entwickler abwägen auf welche Elemente („Details“) und Eigenschaften einer Szene er verzichten kann, ohne dabei für die Anwendung essentielle Informationen aus der Szene zu entfernen.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen virtuellen Welten und herkömmlichen Computeranwendungen ist, dass die „Darstellung einer Szene“ nicht nur über den visuellen Sinneskanal erfolgt, sondern je nach Anwendung stellen VR-Simulationen auch akustische, vestibuläre (Bewegungssystem) und haptische (Tastsinn) Informationen zur Verfügung. Für die Simulation der betreffenden Sinnesmodalitäten gilt Ähnliches wie zuvor am Beispiel der visuellen Simulation erläutert wurde. Aufgrund der Echtzeit-Anforderung an die Berechnung hat die Simulation einer jeden Sinnesmodalität immer einen geringeren Informationsgehalt als die Realität.

Bei traditionellen Computer-Anwendungen erfolgt die Benutzer-Eingabe zumeist über Maus und Tastatur. Folglich „schreiben“ hier die Eingabegeräte dem Menschen die Art und Weise der Interaktion vor. Wenn der Benutzer möchte, dass der Buchstabe ‚K‘ auf dem Bildschirm erscheint, muss er die Taste ‚K‘ drücken. Dagegen gibt in VR-Anwendungen der Benutzer die Aktionen vor und die Anwendung muss adäquat reagieren. Man stelle sich vor, ein Simulationsteilnehmer versucht eine in stereoskopischer Projektion dargestellte Tasse zu greifen. Die Kombination aus Hard- (z.B. Tracking-Gerät oder Kamera) und Software muss in der Lage sein, die Aktion des Beobachters zu „erkennen“ und entsprechend zu „interpretieren“. Durch die Umkehrung des Abhängigkeitsverhältnisses zwischen Benutzer und Eingabe-Elementen ergibt sich eine Vielzahl von Freiheitsgraden, die in Hard- und Software abgedeckt werden müssen.

Zusammenfassend lassen sich die Eigenschaften bzw. Anforderungen virtueller Welten wie folgt beschreiben: *Virtuelle Welten erfordern einerseits die Erzeugung komplexer, realistischer Szenen mit multi-sensorischer Stimulation und andererseits muss das Verhalten des Menschen korrekt interpretiert und in die Erzeugung der Szene einbezogen werden. Entscheidend ist, dass beide Aktionen in Echtzeit, d.h. ohne erkennbare Verzögerung des Systems ausgeführt werden müssen.*

3.2 Geschichte der Virtuellen Realität

Aus technischer Sicht ist das Erzeugen und Darstellen nahezu real erscheinender virtueller Welten mit Echtzeit-Interaktion des Benutzers erst durch enorme technologische Fortschritte in den Bereichen Supercomputer und Präsentationstechnologie möglich geworden. Während die entscheidenden technischen Fortschritte hinsichtlich der Leistungsfähigkeit sicherlich aus den letzten Jahren datieren, wurden die Grundsteine virtueller Welten bereits vor 60-70 Jahren gelegt. Die Betonung liegt hier auf der Mehrzahl (Grundsteine), da das Konzept virtueller Welten erst durch die Vermengung von Ideen und Methoden unterschiedlicher Fachbereiche entstanden ist. Die Wurzeln der „Virtuellen Realität“ finden sich in der Film- und Unterhaltungsbranche, bei den „Naturforschern“ sowie im militärischen Bereich. Aber erst die Computertechnologie und deren Abkömmlinge (Peripheriegeräte) haben

schließlich eine Umsetzung früher Ideen ermöglicht. Eine ausführliche, populärwissenschaftliche Beschreibung der Geschichte virtueller Welten kann bei Rheingold (1995) nachgelesen werden.¹⁰ Wir werden uns im folgenden auf die Darstellung der Meilensteine beschränken.

Ende der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts begann Fred Waller sich mit der Erweiterung des Gesichtsfeldes visueller Präsentationen zu beschäftigen. Zur Finanzierung seiner Arbeiten war Waller lange Zeit auf der Suche nach einem Sponsor. Erstaunlicherweise fand er diesen nicht in Hollywood, sondern bei der *Air Force*. Dort baute er für die Verwendung in Flugsimulatoren ein aus fünf Projektoren bestehendes Filmvorführgerät, wobei der untere Teil des Bildes durch drei, der obere Teil durch zwei Geräte erzeugt wurde. Nach dem Krieg konnte Wallers System schließlich auch in der Filmbranche unter dem Namen „*Cinerama*“ Fuß fassen. Im Vergleich zu der Installation in den Flugsimulatoren verzichtete er dabei auf die oberen beiden Projektoren. Die Bildwände waren an den Außenseiten nach innen gewölbt, um den Zuschauer besser zu „umschließen“. Viele Jahre vor Wallers Arbeiten wurde bereits der Grundstock für stereoskopische Darstellungen gelegt. Sir David Wheatstone baute 1833 ein Spiegelstereoskop, während das Stereoskop wie wir es heute kennen, 1844 durch David Brewster in Betrieb genommen wurde. Ein weiterer Meilenstein in der stereoskopischen Darstellung von Szenen war die Einführung der Anaglyphen-Technik 1858 durch Dalinrida. Das erste photographische Anaglyphensystem wurde 1891 von Duhauron entwickelt. Die Qualität der 3D-Darstellungen profitierte aber vor allem von der Einführung des Polarisationsverfahrens. Erste Vorläufer gab es bereits im 19. Jahrhundert, brauchbare Filter wurden jedoch erst 1928 von Edwin Land vorgestellt.

Neben der Möglichkeit Filmmaterial zu erzeugen und darzustellen waren die Größe des Gesichtsfeldes und die Einführung stereoskopischer Techniken also die ersten entscheidenden Innovationen im Bereich der visuellen Darstellung, die später für die Entwicklung von VR eine wichtige Rolle spielen sollten. Der multimediale Aspekt virtueller Welten wurde durch Morton Heiligs „*Sensorama*“ eingeführt. Inspiriert durch Wallers Arbeiten wollte Heilig Mitte der fünfziger Jahre den Zuschauern ein multimediales Ereignis bieten um ihr Erlebnis um ein Vielfaches zu erhöhen. Nachdem er mehrere Jahre mit Planen und auf der Suche nach Geldgebern verbracht hatte, wurde das Sensorama¹¹ schließlich in den 60iger Jahren gebaut (Patent: 1962). Im Sensorama konnten die Benutzer beispielsweise eine Buggy-Fahrt am Strand hautnah erleben. Die Szene wurde nicht nur mittels visueller und akustischer Signale vermittelt, sondern der Benutzer befand sich zudem auf einer vibrierenden und sich bewegenden Plattform. Äußerst bemerkenswert ist, dass das Gerät auch mit einer Geruchssimulation ausgerüstet war.

Der entscheidende Unterschied zwischen dem ‚Sensorama‘ und einem VR-System ist, dass die dargestellte Szene noch nicht mittels eines Computers erzeugt wurde und der Benutzer des weiteren

¹⁰ Alternativ hierzu bietet auch Kapitel 2 in Roy S. Kalawskys Buch „*The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*“ (1993) einen kurzen, aber guten Überblick über die Geschichte der VR.

nicht mit der Szene interagieren konnte. Die Möglichkeit zur interaktiven Veränderung der Szene wurde erst durch die Einführung von Computern und deren Eingabegeräten möglich. Bevor jedoch Computer in VR-Systemen Anwendung finden konnten, waren auch in diesem Gebiet entscheidende Entwicklungen notwendig. Nach Einführung der ersten Digitalrechner (Zuse: Z1 (1936-38), Z3 (1941); ENIAC, 1946) wurden Computer noch lange Zeit mit Lochstreifen „gefüttert“, bevor in den 60iger und 70iger Jahren Rechner mit Ein- und Ausgabegeräten (Tastatur, Maus, Bildschirm) entstanden wie wir sie heute kennen. Im Gegensatz zur Verwendung von Lochstreifen finden auch Laien bei Verwendung dieser Ein- und Ausgabegeräte einen relativ schnellen Zugang zu Computern. Die einfache Bedienbarkeit durch Tastatur und Maus war nicht nur ein wichtiger Schritt in der allgemeinen Computer-Technologie, sondern stellte auch einen ersten wichtigen Meilenstein für die Realisierung von VR-Systemen dar. Wichtige Namen im Zusammenhang mit der Einführung der Maus und der Tastatur waren Douglas Engelbart und J.C.R. Licklider. Im Hinblick auf VR-Systeme bedürfen Eingabegeräte und –konzepte auch heute noch einer Reihe weiterer Verbesserungen der Benutzerfreundlichkeit.

Der entscheidende Verdienst bei der Einführung von VR-Systemen kommt Ivan Sutherland zu. Mit seinem Programm „Sketchpad“ zeigte er 1962 erstmals, wie ein Benutzer mittels eines Leuchtstiftes direkt auf die Aktivität des Computers und somit auf die Darstellung von Informationen auf einem kleinen Bildschirm Einfluss nehmen kann. Sutherlands Visionen über das „Ultimate Display“ (Sutherland, 1965; Sutherland, 1970) fassen genau jene Inhalte virtueller Welten zusammen, die uns noch heute beschäftigen:

„Wir leben in einer materiellen Welt, deren Eigenschaften uns aus langer Erfahrung vertraut sind. Wir sind so eingebunden in diese materielle Welt, dass wir vorhersagen können... wohin Objekte fallen, wie bekannte Formen aus anderen Blickwinkeln aussehen und welche Kraft aufzuwenden ist, um Objekte gegen den Reibungswiderstand zu bewegen. Unvertraut sind uns dagegen die Kräfte, die auf geladene Teilchen einwirken, die Kräfte in nicht-uniformen Feldern, die Effekte nicht-projektiver geometrischer Transformationen, Bewegungen mit großer Trägheit und geringer Reibung. Ein Display (Bildschirm), das mit einem Digitalrechner verbunden ist, bietet uns die Möglichkeit mit Begriffen vertraut zu werden, die sich in materiellen Welten nicht konkretisieren lassen. Es ist ein Zauberspiegel, der in ein mathematisches Wunderland führt. Wenn das Display als ein Zauberspiegel für ein mathematisches Wunderland dient, das sich in einem Computer entfaltet, sollte es sich an möglichst viele Sinne wenden. Meines Wissens denkt niemand ernsthaft an Computer-Displays für den Geruchs- oder Tastsinn. Es gibt hervorragende Audio-Displays, doch leider sind unsere Möglichkeiten, dem Computer sinnvolle Töne zu entlocken, ziemlich beschränkt. Ich möchte hier ein kinästhetisches Display beschreiben. Wie man den Widerstand der Steuerinstrumente eines Flugsimulators verändert, um den Operator das Gefühl zu vermitteln, er säße in einem richtigen Flugzeug, könnte man auch die Kraft, die erforderlich ist, um einen Joystick zu bedienen, über den Computer steuern. Nehmen wir zum Beispiel ein Computermodell von Teilchen in einem elektrischen Feld. Durch ein solches Display könnten die Kräfte, die auf die Ladungen

¹¹ Beim Sensorama handelt um ein multimodales Erlebniskino für eine Person.

einwirken, für unsere Sinne greifbar werden, und man könnte die manuelle Steuerung eines bewegten Teilchens mit einer visuellen Darstellung der Ladungspositionen verbinden... Eine solche Input-Output-Einheit würden die visuellen und akustischen Möglichkeiten durch ein Kraft-Display ergänzen.“ (zitiert aus H. Rheingold: Virtuelle Welten – Reisen im Cyberspace, 1995).

Sutherlands Arbeiten beschränken sich jedoch nicht nur auf das Programm „Sketchpad“, sondern zusammen mit seinen Mitarbeitern baute er Mitte der 60iger Jahre das erste Head-Mounted-Display („Sword of Damokles“), das zu Beginn der 70iger Jahre zur Darstellung der ersten 3D-Computer-Graphiken¹² im heutigen Sinn verwendet wurde.

Verbesserungen in der Rechenleistung, die Entwicklung leistungsfähiger Graphik-Subsysteme sowie die Entwicklung einer Reihe von Eingabegeräten führten vor allem in den 80iger und Anfang der 90iger Jahre zu einer regelrechten VR-Mania. Bei dieser Entwicklung spielte sicherlich eine sehr große Rolle, dass die Phantasie der Medien durch Cyberspace-Romane (Gibson, 1984) beflügelt wurde. Im Verlauf dieser Welle der Begeisterung wurde eine Vielzahl möglicher Anwendungen von VR vorgeschlagen. Diese reichten von medizinischen Anwendungen (Satava, 1995) über „Virtual Conferencing“ (Mortlock, Machin, Mcconnell, Sheppard, 1997), Architektur (Morgan, Zampi, 1995), Prozessvisualisierung in der Industrie und Fertigung (Rössler, 1995), Behandlung von Phobien in der Psychologie¹³ bis hin zu Anwendungen in der Entertainment-Industrie (Disney Quest). Trotz enormer technischer Fortschritte sind die meisten Anwendungen, die zu Beginn der neunziger Jahre propagiert wurden, bislang nicht realisiert. Die Phantasiewelt der Romane hat falsche Vorstellungen darüber geweckt, wie einfach der Mensch in virtuelle Welten entführt werden kann.

Wie wir im folgenden Abschnitt zeigen, befinden sich die Entwickler virtueller Welten in einem Dilemma: Der Mensch sowie alle Geräte eines VR-Systems befinden sich in der realen Welt. Der Schritt in die virtuelle Welt kann nur durch eine gezielte Manipulation des Informationsflusses zwischen Mensch und Umwelt erzeugt werden. Da wir nur wenig darüber wissen, wie und welche Informationen der Mensch in alltäglichen Situationen verarbeitet, gestaltet sich die gezielte Manipulation der Informationsinhalte als schwierig.

Der vergleichsweise kleine Raum, der für die Darstellung der Arbeiten der 80iger und 90iger Jahre eingeräumt wurde bedeutet nicht, dass in dieser Zeit kein Fortschritt stattgefunden hat. Aber im wesentlichen handelt es sich bei den Entwicklungen aus dieser Zeit um eine Verfeinerungen früherer Konzepte sowie deren technische Umsetzung. Insgesamt hat sich gezeigt, dass sich die Umsetzung der Visionen früher VR-Pioniere weit schwieriger gestaltet als angenommen. Ein großer Verdienst gebührt in diesem Zusammenhang sicherlich NASA Ames (Ellis, 1991; Ellis, 1993) und der University of North Carolina in Chapel Hill (Brooks, 1999).

¹² Gemeint ist damit die Verwendung von speziellen Verfahren der 3D-Computer-Graphik wie Clipping und Hidden-Line-Removal.

¹³ Angst vor Spinnen: Carlin, Hoffmann, Weghorst, 1997, Höhenangst: Rothbaum, Hodges, Kooper, Opdyk, Williford, North, 1995, Flugangst: Mühlberger, Herrmann, Wiedemann, Pauli, 1999

3.3 Informationsfluss zwischen Mensch und Umwelt

3.3.1 Einleitung

Regelkreise, wie sie in der biologischen Kybernetik verwendet werden, bieten ein sehr nützliches Werkzeug um den Informationsfluss zwischen zwei oder mehreren Systemen darstellen und analysieren zu können. In der natürlichen Umwelt findet der Informationsfluss zwischen dem Menschen und seiner Umwelt in einem geschlossenen Regelkreis statt (Abb. 3, siehe auch Bülthoff, Foese-Mallot, Mallot, 1997; Distler, Van Veen, Braun, Bülthoff, 1998; Bülthoff, Van Veen, 1999).

3.3.2 Informationskreislauf in der natürlichen Umwelt

Die Umwelt stellt dem Menschen eine Vielzahl von Informationen zur Verfügung. Aufgrund der begrenzten Bandbreite seiner Sinnesorgane kann dieser jedoch nur einen kleinen Teil der bereitgestellten Informationen wirklich aufnehmen. Nach einer mehrstufigen Verarbeitungskette führt die Auswertung dieser Informationen zu einer Handlung. Diese kann vielfältige Gestalten annehmen, von einer Verschiebung der Aufmerksamkeit bis hin zur Fortbewegung des Menschen. Dabei führt die Handlung entweder zu einer Änderung des Aussichtspunktes der Welt (Fortbewegung) oder sie bedingt eine Veränderung der Struktur der Umwelt, wie dies beim Greifen und Bewegen von Objekten der Fall ist. Die so veränderte Umwelt „präsentiert“ sich dann wieder den Sinnesorganen des Menschen.

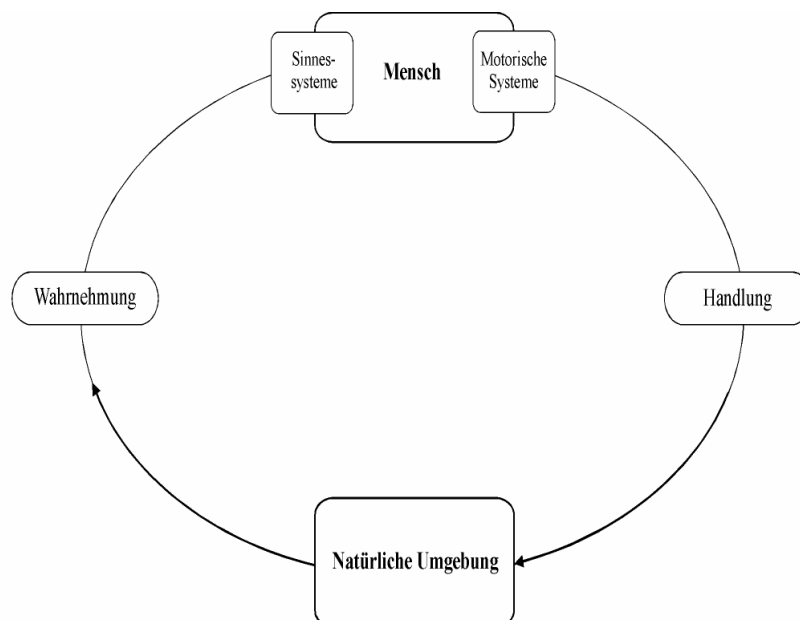


Abb. 3 Vereinfachte Darstellung des Informationsflusses zwischen dem Menschen und seiner Umwelt in der natürlichen Umgebung (siehe Text).

3.3.3 Informationskreislauf in der virtuellen Umwelt

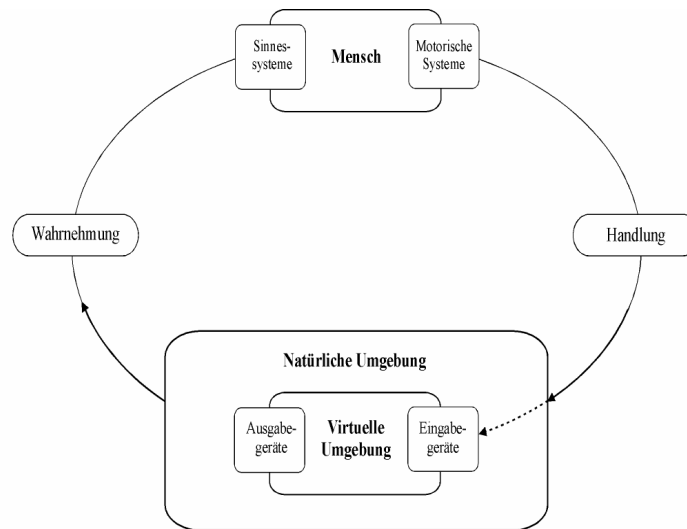


Abb. 4 Vereinfachte Darstellung des Informationsflusses zwischen dem Menschen und seiner Umwelt in virtuellen Umgebungen (siehe Text).

Der Informationskreislauf in virtuellen Umgebungen (Abb. 4) ist weitaus komplizierter. Hier liegt nicht mehr eine einzige, sondern zwei Umwelten vor, wobei die virtuelle Welt in die natürliche Umwelt eingebettet ist. Der Mensch befindet sich zwar physikalisch in der natürlichen Umwelt, soll aber vorwiegend mit der virtuellen Welt interagieren. Die Interaktion zwischen dem Menschen und der virtuellen Welt wird durch Eingabegeräte vermittelt, die sich in der realen Welt befinden. Die Eingabegeräte (Tracking-System, Bedienelemente von Autos, Flugzeugen oder Fahrrädern) nehmen die Handlungen des Menschen auf und leiten die betreffenden Daten an den Simulationsrechner weiter. Dessen Software nimmt auf der Basis der Eingabedaten adäquate Veränderungen der virtuellen Welt vor. Die virtuelle Welt wird dem Menschen schließlich durch Ausgabegeräte (Monitor, HMD, Projektion, Akustik, Bewegungssystem, etc.) präsentiert. Genau wie die Eingabegeräte sind auch die Ausgabegeräte Bestandteil der realen Welt.

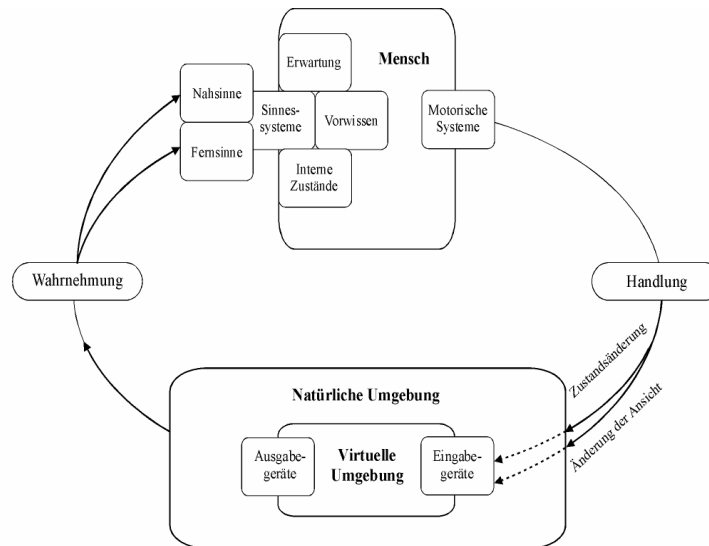


Abb. 5 Erweiterte Darstellung des Informationsflusses zwischen dem Menschen und seiner Umwelt in virtuellen Umgebungen (siehe Text).

Je nach Fragestellung kann die Darstellung des Regelkreises in beliebigen Komplexitätsstufen erfolgen. Während der Regelkreis in Abb. 4 nur grundlegende Aussagen über den Informationsfluss in virtuellen Welten zulässt, erlaubt der in Abb. 5 dargestellte Regelkreis bereits genauere Aussagen hinsichtlich einzelner Komponenten und deren Zusammenhänge. Ein genaues Verständnis des Informationsflusses virtueller Welten erfordert die Verwendung unterschiedlicher Komplexitätsstufen.

3.3.4 Besonderheiten des Informationsflusses in virtuellen Welten

Der Handlungs-Wahrnehmungszyklus¹⁴ in der virtuellen Umwelt unterscheidet sich also in drei wesentlichen Merkmalen von dem in der natürlichen Umwelt:

- Es liegen “zwei Umwelten” vor, wobei die virtuelle in die natürliche Umgebung eingebettet ist.
- Die Ein- und Ausgabegeräte führen einerseits zu Verzögerungen im Informationsfluss zwischen Mensch und simulierter Umwelt, andererseits sind vor allem die Eingabegeräte nur Mediatoren von Informationen und Aktionen. Dies bedeutet, mit Hilfe dieser Geräte müssen Aktionen des Menschen interpretiert werden, bevor sie Auswirkungen auf die virtuelle Welt haben. Der Interpretationsprozess stellt eine potentielle Fehlerquelle beim Betrieb der Mensch-Maschine-Schnittstelle dar.
- Die virtuelle Welt ist nur ein sehr unvollständiges Abbild der natürlichen Umwelt.

¹⁴ In der Literatur finden sich je nach Schwerpunkt eines Forschungsgebietes verschiedene Begriffe zur Bezeichnung desselben Sachverhaltes. Handlungs- Wahrnehmungszyklus, „action-perception-loop“ und geschlossener Regelkreis weisen alle auf die Bedeutung eines kontinuierlichen, zweiseitigen Informationsflusses zwischen Mensch und Umwelt hin.

3.3.5 Photorealismus und Funktionalität

Das mangelhafte Verständnis der Mensch-Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten stellt sicherlich den Hauptgrund dar, warum viele vor allem zu Beginn der 90iger Jahre vorgeschlagene Anwendungen bis heute nicht realisiert wurden. Aufgrund technologischer Beschränkungen und der Missachtung grundlegender Eigenschaften des menschlichen Wahrnehmungsapparates kommt es bei der Anwendung von VR häufig zum Auftreten bestimmter ‚Nebenwirkungen‘, die im Fachjargon unter dem Begriff ‚Simulationskrankheit‘ (Kennedy, Lane, Lilienthal, Berbaum, Hettinger, 1992; Kennedy, Jones, Lilienthal, Harm, 1993) zusammengefasst werden. Die Symptome der Simulationskrankheit reichen von Ermüdung der Augen über Übelkeit bis hin zur völligen Desorientierung. Je nach Situation erfordert das Auftreten der Symptome entweder einen Abbruch der Simulation oder es kommt zu Einbrüchen in der Leistungsfähigkeit der Simulationsteilnehmer.

Seit Ende der 80iger Jahre standen eher die Begriffe „schneller“, „größer“ und „besser“ für eine Weiterentwicklung virtueller Welten. Es wurden immer größere und schnellere Computer gebaut, um die virtuelle Welt der natürlichen Umwelt ähnlicher werden lassen zu können. Das Fernziel dieser Bestrebungen sind photorealistisch erscheinende virtuelle Welten. Allerdings ist fraglich, ob dieses Ziel jemals erreicht werden kann. Selbst wenn der Rechner ein photorealistisches Abbild der Welt in numerischer Form bereitstellt, so führt die Verwendung von Displays zu einer inkorrekten Darstellung dieser Welt.¹⁵ Das „photorealistische Erscheinungsbild“ einer simulierten Welt stellt sicherlich ein eingängliches und allgemein verständliches Bewertungskriterium für die Qualität einer VR-Anwendung dar. Jedoch lassen sich auf dieser Basis sicherlich keine Aussagen hinsichtlich der Funktionalität einer VR-Anwendung machen. Die Funktionalität einer VR-Anwendung ist erst dann gegeben, wenn der Benutzer seine Aufgabe in der virtuellen Welt erfüllen kann und sich dabei „wohl fühlt“.

3.3.6 Virtualität als Teil der Realität

Die enge Verknüpfung von realer und virtueller Welt, wie sie sich im biokybernetischen Modell des Informationsflusses zeigt, macht eine Diskussion der Begriffe „Immersion“ und „Presence“ (Slater, Usoh, Steed, 1994) hinfällig. Das Ziel einer VR-Anwendung muss die Gewährleistung eines „friedlichen Nebeneinanders“ von Realität und Virtualität sein. Das komplette Abtauchen in die Virtualität ist durch die Romanwelt (Gibson, 1984) motiviert und bringt unter Berücksichtigung aller Faktoren keine greifbaren Vorteile für die Anwendbarkeit von VR-Simulationen. Die virtuelle Studierstube von Szalavári & Gervautz (Szalavári, Gervautz, 1997; Szalavári, Gervautz, 1998) ist ein Beispiel für eine Anwendung, die auf elegante Weise reale und virtuelle Welt verbindet. Der Benutzer

¹⁵ Beispielsweise kommt bei der Mehrzahl der verwendeten Displays die Helligkeit in der Bildebene und nicht in der Entfernung der Objekte zu liegen.

hält eine Schiefertafel samt Zeigestift in Händen. Die Position und die Ausrichtung beider Elemente werden durch ein Tracking-System erfasst und an den Simulationsrechner weitergeleitet. Der Rechner erzeugt ein graphisches Abbild einer Menüoberfläche, die dem Benutzer mittels eines HMD mit halbdurchlässiger Optik präsentiert wird. Für den Benutzer entsteht der Eindruck einer der Schiefertafel überlagerten Menüoberfläche. Mit dem Stift kann der Benutzer virtuelle Menüfunktionen aktivieren und hat dabei gleichzeitig haptische Rückkoppelung.

Da alle Geräte zur Realisierung der virtuellen Welt Bestandteil der realen Welt sind, unterliegen die zur Übertragung der „Illusion“ virtueller Welten verwendeten Medien (Licht, Schall) den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der „realen Welt“. Die Illusion beruht also einzig und allein auf einer gezielten Manipulation des vermittelten Informationsinhaltes, womit wir am entscheidenden Punkt unserer Überlegungen angelangt sind. Die gezielte Manipulation von Informationsinhalten bedarf der genauen Kenntnis des Informationsflusses und der informationsverarbeitenden Prozesse des Menschen unter den Bedingungen einer bestimmten VR-Anwendung. Die Darstellung des Informationsflusses in Form von Regelkreisen eignet sich sehr gut als Ausgangspunkt bei der Planung von VR-Anwendungen. Nachdem der Informationsfluss in einer VR-Anwendung definiert ist, können Wissen und Methoden der Wahrnehmungsforschung verwendet werden, um die Informationsinhalte gezielt zu verändern.

3.3.7 Anwendung von Wissen der Wahrnehmungsforschung

Welche Fragen im Einzelnen zu Beginn des Entwicklungsprozesses einer Simulationsanlage gestellt werden sollten, hängt von der jeweiligen Anwendung der Simulation ab. Gemeinsam ist allen die Fragestellung “Wie kann ich mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln unter Berücksichtigung der jeweiligen Anwendung und der verfügbaren Technologie eine virtuelle Welt erzeugen, die alle gewünschten und notwendigen Informationen in adäquater Form zur Verfügung stellt? ”

Im folgenden haben wir exemplarisch einige Fragen aufgeführt, die zu Beginn der Planung einer VR-Anlage beantwortet werden sollten. Die Liste soll nur einen Denkansatz darstellen und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit:

- Welche Informationsquellen benötige ich, damit dem Simulationsteilnehmer genügend Information vermittelt wird, um sich problemlos in der virtuellen Welt orientieren und verhalten zu können? In manchen Fällen ist es völlig ausreichend, nur visuelle Informationen zu vermitteln, während in anderen Fällen zusätzliche akustische oder durch Bewegungsplattformen erzeugte Signale entscheidend zur Verbesserung der menschlichen Wahrnehmung in der virtuellen Welt beitragen können.
- Wie können bestimmte Eigenschaften der virtuellen Welt verbessert werden? Erkenntnisse aus der

Wahrnehmungsforschung bieten eine ganze Palette von Möglichkeiten an, um beispielsweise den visuellen Tiefeneindruck einer Simulation zu verbessern. Einige dieser Tiefenhinweise, wie z.B. Bewegungsparallaxe und stereoskopische Darstellung sind vergleichsweise einfach zu implementieren. Andere, wie z.B. die Zunahme des Anteils an blauem Licht in Abhängigkeit von der Entfernung bereiten einerseits Schwierigkeiten bei der Implementierung und tragen andererseits nur wenig zur Verbesserung des Tiefeneindrucks bei.

- Können bestimmte Strukturen einer Simulation überhaupt wahrgenommen werden? Es macht wenig Sinn, sehr detaillierte 3D-Modelle von Objekten zu verwenden, wenn sie auf dem Bildschirm aufgrund der großen Entfernung vom Beobachter nur eine Größe von wenigen Pixeln einnehmen.
- Mit Hilfe welcher Eingabegeräte und Konzepte kann eine Mensch-Maschine-Schnittstelle geschaffen werden, deren Bedienung dem Menschen entgegen kommt?

Viele Labors haben diese Vorgehensweise bereits in Ansätzen verwirklicht. Beispielsweise werden auf der Suche nach geeigneten Eingabegeräten Tests durchgeführt, die prüfen, welches Gerät bei einer bestimmten Aufgabenstellung eine verständliche und einfache Interaktion des Simulationsteilnehmers mit der virtuellen Welt ermöglicht. Zumeist sind diese Fragestellungen jedoch sehr spezifisch hinsichtlich der Eignung von bestimmten Ein- oder Ausgabegeräten. Zu selten wird hinterfragt, warum aus Sicht der menschlichen Wahrnehmung ein Gerät besser geeignet ist als ein anderes. Aus diesem Grund können die Ergebnisse dieser Tests anderen Arbeitsgruppen oft nur als Richtwerte dienen, tragen aber weder zum Verständnis noch zur Entwicklung neuer Konzepte für Mensch-Maschine-Schnittstellen bei.

Da die Kenntnisse über die Wahrnehmung und das Verhalten des Menschen noch sehr begrenzt sind, wird der Entwickler von VR-Welten häufig auf experimental-psychologische Fragestellungen treffen, die nicht ohne weiteres beantwortet werden können. Hier empfiehlt sich, falls machbar, folgende Vorgehensweise: Unter Berücksichtigung bereits vorliegender Kenntnisse über die Wahrnehmung des Menschen wird ein Prototyp einer VR-Anlage aufgebaut, der bereits möglichst viele Komponenten der geplanten Anwendung enthält. In diesem Prototypen werden dann Verhaltensexperimente durchgeführt, um noch ausstehende Fragen hinsichtlich der menschlichen Wahrnehmung beantworten zu können.

Ein Beispiel für die gezielte Verwendung von Wissen über die Wahrnehmung des Menschen im Entwicklungsprozess virtueller Welten ist ein Verfahren, bei dem das „Level of Detail Handling (LOD)¹⁶“ von 3D Computer-Graphikmodellen an die räumlich-zeitlichen Eigenschaften (Kelly, 1975, 1979, 1984) des visuellen Systems des Menschen angepasst wird (Reddy, 1997; Reddy, Watson,

¹⁶ Bei Verwendung von LODs wird das 3D-Computer-Graphikmodell eines Objektes in Abhängigkeit von seiner Entfernung vom Betrachter in unterschiedlichen Komplexitätsstufen (Zahl der Polygone, Auflösung der Textur)

Walker, Hodges, 1998). Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften des visuellen Systems werden die Geometrien der LODs sowie die Entfernungen zum Umschalten zwischen zwei LODs so präpariert, dass der Betrachter den Übergang zwischen zwei LODs nicht wahrnehmen kann. Auf diesem Wege wird ein kontinuierlicher Übergang zwischen zwei LODs auch ohne die Verwendung rechenintensiver Überblend- oder Morphing-Verfahren erreicht.

3.3.8 Zusammenfassung

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle ist das zentrale Element aller VR-Anwendungen. Zum jetzigen Zeitpunkt müssen sich allerdings die Wahrnehmung und das Verhalten des Menschen zumeist an die Eigenschaften der Mensch-Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten anpassen. Erst die vermehrte Verwendung von Grundlagenwissen und Methoden der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung wird es ermöglichen die Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten so zu gestalten, dass diese optimal an den Wahrnehmungsapparat des Menschen angepasst wird. Erst dann werden wir in der Lage sein, das große Anwendungspotential virtueller Welten zu nutzen.

dargestellt. Je weiter das Objekt vom Betrachter entfernt ist desto weniger Detailstrukturen enthält sein 3D-Modell.

4 Wahrnehmungsforschung und Virtuelle Welten - eine zweiseitige Beziehung

4.1 Zwei Untersuchungen in einem Experiment

Die in den ersten beiden Abschnitten angeführten allgemeinen Überlegungen haben den neuartigen Charakter virtueller Welten im Bezug auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle verdeutlicht. Des weiteren wurde in diesem Zusammenhang die zweiseitige Beziehung zwischen Wahrnehmungsforschung und virtuellen Welten ausführlich diskutiert. Die Wahrnehmungsforschung profitiert von der Verfügbarkeit virtueller Welten, da Experimente, die bis dato an einem zu großen Aufwand scheiterten, durchführbar geworden sind. Wissen und Methoden der Wahrnehmungsforschung können im Gegenzug zu einer signifikanten Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten beitragen. Trotz dieser Einsicht herrscht sowohl bei den Experimental-Psychologen als auch bei den „Technologen“ nach wie vor die Meinung vor, dass zum Erreichen beider Zielsetzungen unterschiedliche Typen von Fragestellungen und experimentellen Paradigmen benötigt werden. Unsere Experimente werden zeigen, dass letztendlich geringfügige Änderungen der Fragestellung und des experimentellen Paradigmas von Wahrnehmungs- und Verhaltensexperimenten genügen, um beide Zielsetzungen im gleichen Experiment bearbeiten zu können.

4.2 Überblick zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung

Während der Einführung eines Fahrrad-Simulators (siehe Kapitel 5 und Anhang A) in unserem Labor bemängelten Teilnehmer des häufigeren den mangelhaften Geschwindigkeitseindruck der Simulation. Zur Bestimmung von Faktoren, die für das Unterschätzen der Fahrgeschwindigkeit verantwortlich sind, haben wir in unserem ersten Experiment (Kapitel 6) auf der Basis der Ergebnisse früherer Untersuchungen den Einfluss des Kontrastes, der räumlichen Frequenz, der Größe des Gesichtsfeldes und der Dichte von Objekten auf die wahrgenommene Fahrgeschwindigkeit untersucht. Im Unterschied zu früheren Arbeiten haben wir den Einfluss dieser Eigenschaften nicht mit 2D-Mustern, sondern unter Verwendung von 3D optischen Flussfeldern untersucht.

4.3 Überblick zur Geschwindigkeitskonstanz

In unserem zweiten Experiment (Kapitel 7) haben wir uns mit dem Thema der Geschwindigkeitskonstanz (Brown, 1928) beschäftigt. Bislang ist wenig untersucht und stark umstritten, wie und mit welchen anderen Informationen (z.B. Entfernung, Größe, etc.) die Information über die Winkelgeschwindigkeit eines Objektes zur Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit

kombiniert wird. Ausgangspunkt unserer Experimente war die Frage: „Erhalten wir unter realistischeren Bedingungen die gleichen, grundlegenden Ergebnisse wie frühere Arbeiten unter Verwendung einfacher Reize?“ Nachdem diese Frage positiv beantwortet wurde, untersuchten wir in Folgeexperimenten, wie sich eine Vielzahl von Entfernungshinweisen und deren Kombinationen auf die Wahrnehmung der physikalischen Geschwindigkeit auswirken. Besonderen Wert haben wir dabei auf die Untersuchung des Einflusses der Größe und hier vor allem der bekannten Größe von Objekten (Vorwissen) auf die Wahrnehmung der Objektgeschwindigkeit gelegt.

4.4 Überblick zur Wahrnehmung in realen und virtuellen Welten

In den einleitenden Kapiteln wurden bereits mögliche Gefahren der Verwendung virtueller Welten in der Wahrnehmungsforschung diskutiert (Abschnitt 2.4). Im Rahmen unseres dritten Experimentes (Kapitel 8) stellen wir ein Paradigma zur Minimierung der „Gefahr einer virtuellen Wahrnehmungsforschung“ vor. Die Grundlage des Paradigmas ist die parallele Untersuchung einer Verhaltensleistung des Menschen in der realen und der virtuellen Welt. Das Paradigma wird am Beispiel eines Navigationsexperimentes eingeführt. Nachdem Versuchspersonen eine Landschaft auf der schwäbischen Alb durchwandert hatten, mussten sie die relative Richtung und Entfernung von Plätzen bestimmen.

5 Versuchsaufbau

5.1 Hardware

Zur Durchführung der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden in unsrem Labor in den Jahren 1994-1997 insgesamt drei Generationen einer VR-Simulationsanlage aufgebaut. Die Beschreibung der Planung und des Aufbaus der Simulationsanlagen sowie eine ausführliche Diskussion einzelner Bauteile kann in Anhang A nachgelesen werden. In allen Generationen war ein „virtuelles Fahrrad“ (VR-Fahrrad) neben dem Simulationsrechner und der Projektionseinrichtung zentraler Bestandteil der Simulationsanlage (Abb. 6). Die folgende Einführung des Versuchsaufbaus beschränkt sich auf die Beschreibung der zur Durchführung der Experimente wesentlichen Bestandteile der dritten Generation der Simulationsanlage.



Abb. 6 Das Bild (digitaler Snapshot eines Radiosity-Renderings) zeigt die Anordnung von Leinwand, Projektoren und VR-Fahrrad in der dritten Generation der Simulationsanlage. Die Verzerrungen an der linken Seite der Leinwand sind durch die Position der virtuellen Kamera bedingt. Die Geometrie der Projektion ist so korrigiert, dass für einen auf dem Fahrrad sitzenden Betrachter keine Verzerrungen sichtbar sind.

Das Kernstück der Simulationsanlage ist eine Silicon Graphics™ Onyx2 InfiniteReality, (siehe Silicon Graphics, Inc. 1998, 3 Graphic-Pipelines, 10x195 MHz R10000 Prozessoren, 2.5 GB RAM, 2 RM6 mit 64 MB TRAM pro Pipeline). Auf diesem Rechner werden sämtliche Berechnung der Simulation durchgeführt, d.h. auf dem Rechner erfolgt die Verarbeitung der Ein- und Ausgabe, die Berechnung der Dynamik des Fahrrades sowie die Erzeugung der Bilder. Insgesamt werden drei Bilder berechnet, die durch ebenso viele CRT-Projektoren (Electrohome™ Marquee 8000) per Aufprojektion auf einer zylinderförmigen Leinwand (Radius 3.5m, Höhe 3.15m) dargestellt werden.

Für einen Betrachter, der sich im Zentrum der Leinwand befindet ergibt dies ein Gesichtsfeld der Größe $180 \times 50^\circ$. In allen Versuchen entsprach die geometrische (simulierte) der physikalischen (Leinwand) Größe des Gesichtsfeldes.¹⁷ Die effektive Auflösung des Gesamtbildes beträgt 3544×1024 Pixel (ca. $20 \text{ Pixel}/^\circ$ oder $3 \text{ '}/\text{Pixel}$), wobei jedes Einzelbild eine Auflösung von 1280×1024 Pixel hatte. Die Videorate der Darstellung betrug 72 Hz , die Bildwiederholrate¹⁸ bei mittlerer Szenenkomplexität 36 bzw. 72 Hz . Sofern erwünscht, konnte die Szene auch in stereoskopischer Projektion dargestellt werden (LCD-Shutterglases, Auflösung des Gesamtbildes: 2835×768 Pixel, Auflösung eines Einzelbildes: 1024×768 Pixel, ca. $15 \text{ Pixel}/^\circ$ oder $4 \text{ '}/\text{Pixel}$, Videorate: 72 Hz). Ein nahtloser Übergang zwischen den einzelnen Bildern wird durch die Verwendung eines Soft-Edge-Blending-Systems (siehe Anhang A) erreicht, wobei die Überlappungszonen eine Größe von 7.5° hatten.

Die Interaktion der Versuchspersonen mit der Szene erfolgte in den ersten beiden Experimenten (Kapitel 6 und 7) durch die Tastatur, im dritten Experiment (Kapitel 8) haben wir das VR- Fahrrad verwendet. Die ersten beiden Experimente wurden unter Anwendung eines offenen, das dritte Experiment unter Anwendung eines geschlossenen Regelkreises durchgeführt. Verantwortlich für die Wahl des Regelkreis-Designs war die Fragestellung der Experimente, deren Beantwortung eine genaue Kontrolle der experimentellen Bedingungen erforderlich machte.

Durch die Verwendung des VR-Fahrrades wollten wir die Orientierungsfähigkeit der Versuchsteilnehmer in Navigationsexperimenten verbessern.¹⁹ In seinen Aufbau ähnelt das VR-Fahrrad einem Liegefahrrad. Gelenkt wird durch zwei Hebel links und rechts des Sitzes. Die Hebel sind sowohl miteinander als auch mit dem Rahmen des Fahrrades gekoppelt. Eine Lenkbewegung führt zu einer entsprechenden Kippbewegung des Fahrrades entlang seiner Längsachse. Die Pedale des Fahrrades sind mit einem Schwungradsystem verbunden. Der Tretwiderstand kann durch einen computer-gesteuerten DC-Motor kontrolliert werden. Die Größe der Lenkbewegung und die Trittfrequenz werden durch opto-elektronische Messaufnehmer bestimmt und an den Simulationsrechner (via PC) weitergeleitet. Auf dem Simulationsrechner wird unter Einbeziehung der Eigenschaften des Terrains (Steigung, Gefälle, Reibwert) und der physikalischen Eigenschaften des Fahrrades (Masse, etc.) die neue Position und Orientierung des Fahrradfahrers in der virtuellen Welt berechnet. Im letzten Schritt der Berechnung der dynamischen Eigenschaften des Fahrrades werden die Daten zum Einstellen des Tretwiderstandes an den PC gesendet.

¹⁷ Veränderungen der simulierten (geometrischen) Größe des Gesichtsfeldes bei gleichbleibender physikalischer Größe des Gesichtsfeldes beeinflussen die „wahrgenommene“ Position des Betrachters in der simulierten Szene (Psočka, Lewis, 1995; Psočka, Lewis, King, 1998)

¹⁸ Der Begriff „Bildwiederholrate“ entspricht dem englischen Begriff „Frame-Rate“.

5.2 Software

5.2.1 3D Computer-Graphikmodelle

In den ersten Projektphasen erfolgte das Modellieren der virtuellen Welten („Datenbasen“) mit dem Medit® 3D-Modeller. Im weiteren Verlauf wurde dieser, teilweise bedingt durch gestiegene Anforderungen durch den MultiGen II®-Modeller ersetzt.

5.2.2 Echtzeit-Animation

Die Echtzeit-Animations-Anwendungen wurden mit C/C++ entwickelt. Kernstück der Simulationssoftware ist Iris Performer (Version 1.2, Version 2.0, Version 2.1, Version 2.2, siehe Rohlf, Helman, 1994), eine spezielle Bibliothek von Silicon Graphics™, die das Implementieren von Echtzeit-Anwendungen mit komplexer Funktionalität stark vereinfacht.

¹⁹ Eine ausführliche Beschreibung unserer Motivation sowie der Technologie des VR-Fahrrades findet sich in Anhang A

6 Geschwindigkeitswahrnehmung in Virtuellen Welten

6.1 Beschreibung der Ausgangssituation

In ersten Experimenten und Vorführungen des VR-Fahrradsimulators bemängelten die Simulationsteilnehmer, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung der Fahrsimulation nicht korrekt sei. Sie waren der Ansicht, dass ihre Anstrengungen auf dem Fahrrad zu einer höheren Fahrgeschwindigkeit in der Simulation führen hätten müssen. Da Fehler in der Berechnung der Fahrgeschwindigkeit durch eine genaue Überprüfung ausgeschlossen wurden, handelte es sich folglich um ein subjektives Unterschätzen der Fahrgeschwindigkeit durch die Simulationsteilnehmer. Um die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung ihren Erwartungen anzupassen, erhöhten die Simulationsteilnehmer entweder die Trittfrequenz oder den Gang. Beides hatte zur Folge, dass sie bereits nach wenigen Minuten ermüdeten. Da es hierdurch zumindest zu Einbußen in der Verhaltensleistung kommt, wenn nicht sogar zu einem frühzeitigen Abbruch der Experimente, war es unser Ziel die „wahrgenommene Geschwindigkeit“ im Fahrradsimulator zu verbessern, um so einen reibungslosen Ablauf der Experimente zu gewährleisten.

Wie nachfolgende informelle Recherchen zeigten, ist die Problematik des Unterschätzens der Fahrgeschwindigkeit in vielen Simulationsanwendungen zu beobachten. Je nach Anwendungsgebiet eines Simulators können die Auswirkungen einer Fehleinschätzung der Geschwindigkeit unterschiedlich schwerwiegend sein. Besonders fatal sind die Auswirkungen bei Simulatoren, die zur Fahrausbildung eingesetzt werden.²⁰ Fehleinschätzung der Geschwindigkeit durch die Fahrschüler führen dazu, dass sie in der Simulation schneller fahren als sie dies in der entsprechenden natürlichen Umgebung tun würden. Eine Fahrausbildung im Simulator würde somit zwar helfen, Kosten zu senken, da es aber möglicherweise zur Übertragung falscher Lerninhalte aus dem Simulator in die reale Fahrsituation kommt, birgt die Fahrausbildung im Simulator gleichzeitig ein großes Gefahrenpotential in sich.

Eine Ursache für die Fehleinschätzung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in Simulatoren ist sicherlich, dass Geschwindigkeitsinformation nur über wenige Sinneskanäle vermittelt wird, wobei sich die Darbietung von Geschwindigkeitsinformationen zumeist auf den visuellen Kanal beschränkt. Ergebnisse von Ohta & Kamatsu (1991) weisen jedoch darauf hin, dass es sich bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung um eine multi-modale Wahrnehmungsleistung handelt. Diese Beobachtung wird ferner durch die Ergebnisse der Experimente von Evans (1970) und Semb (1969) bestätigt. Während Evans die Bedeutung akustischer Reize bei der Geschwindigkeitswahrnehmung betont, fand Semb unter „Blindsight“-Bedingungen bei gleichzeitiger

²⁰ Die Verwendung von Simulatoren zur Fahrausbildung beschränkt sich vorwiegend auf den militärischen Bereich, wobei auch diese Anwendung noch in den Kinderschuhen steckt.

Abschwächung der akustischen Information, dass kinästhetische und vestibuläre Reize ausreichend sind, um Abschätzungen der Fahrgeschwindigkeit mit vernünftiger Genauigkeit durchführen zu können. Die Beschränkung auf die Simulation weniger Sinneskanäle und hier vorwiegend auf die Simulation des visuellen Kanals erklärt sich sowohl aus technischer als auch aus wissenschaftlicher Sicht. Die Entwicklung der Computer-Graphik ist im Vergleich zur Simulation anderer Sinnesinformationen weit fortgeschritten. Damit können die visuellen Aspekte der Fortbewegung vergleichsweise einfach nachgebildet werden. Andere Eigenschaften realer Fahrzeuge wie beispielsweise die „tatsächliche“ Fortbewegung im Raum können in Fahr-Simulatoren nur beschränkt oder überhaupt nicht simuliert werden. Ein weiterer Grund für die Konzentration auf den visuellen Kanal ist die subjektive Dominanz der visuellen Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung. Diese Einschätzung ist sicherlich auch die Grundlage für die Annahme, dass 90% der beim Fahren verarbeiteten Information visueller Natur sind. Allerdings konnte eine Literatur-Studie (Sivak, 1996) keine wissenschaftlich fundierte Bestätigung dieser Annahme finden.

6.2 Denkansätze zur Problembhebung

Im vorangehenden Abschnitt haben wir die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung einer allgemeinen Betrachtung unterzogen. Je nach Typ, Anwendungsgebiet und Budgetrahmen des Projektes ergeben sich mehrere Möglichkeiten die Wahrnehmung der Geschwindigkeit in einem Simulator zu verbessern. Wir haben in diesem Zusammenhang folgende, zum Teil sehr einfache Vorgehensweisen zur Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung im Fahrradsimulator in Betracht gezogen:

1. Nach der Berechnung der Geschwindigkeit des Fahrradfahrers unter Einbeziehung des physikalischen Modells, wird die resultierende Geschwindigkeit mit einem Faktor (>1.0) multipliziert. Die genaue Größe des Faktors wird dabei in Vorversuchen bestimmt. Dort „radeln“ die Teilnehmer entlang einer simulierten Wegstrecke. Während der Fahrt wird der Verstärkungsfaktor solange verändert, bis die dargestellte Geschwindigkeit den Anstrengungen (Erwartungen) der Teilnehmer entspricht. Diese Lösung kann schnell und ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Allerdings birgt diese Lösung auch eine Reihe von Gefahren und Schwachpunkten in sich:
 - Beispielsweise ist zu erwarten, dass sich der genaue Wert des Verstärkungsfaktors von Versuchsperson zu Versuchsperson unterscheidet. Damit muss der Vorversuch für jede Versuchsperson durchgeführt werden. Eventuell hängt der Verstärkungsfaktor sogar von der Tagesform eines Versuchsteilnehmers ab.
 - Bei einer Fahrt entlang einer Allee wird die Fahrgeschwindigkeit bei gleicher objektiver Fahrgeschwindigkeit anders wahrgenommen als bei einer Fahrt auf einer freien Fläche.

Dies weist darauf hin, dass der Wert des Verstärkungsfaktors sehr stark durch Elemente und Eigenschaften der dargestellten Szene beeinflusst wird.

- Das Fahrrad hat keine sichtbaren Räder. Deshalb werden die Teilnehmer unterschiedliche Vorstellungen über den Durchmesser ihrer Reifen entwickeln. Der „vorgestellte Durchmesser“ ist aber wiederum entscheidend für die Größe des Geschwindigkeitsfaktors.

Die Behebung des Geschwindigkeitsproblems durch Verwendung eines Korrekturfaktors ist zwar einfach und schnell durchzuführen, erzeugt aber ebenso viele Probleme wie sie löst. Eine derartige Vorgehensweise ermöglicht eine einmalige Lösung des Problems, jedoch wird auf diesem Weg kein Grundlagenwissen geschaffen, welches auch in anderen Implementierungen umgesetzt werden kann.

2. Auf systematische Weise wird untersucht, welche Faktoren für die Unterschätzung der Fahrgeschwindigkeit im Fahrradsimulator verantwortlich sind. Auf den ersten Blick ist offensichtlich, dass der Fahrradsimulator nur einen Bruchteil der Informationen eines „realen“ Fahrrades bietet. Zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit stehen im Fahrradsimulator nur die Anzahl der Pedalumdrehungen, die Geschwindigkeit des Tretens, der Tretwiderstand und die visuelle Simulation zur Verfügung. Im Vergleich hierzu existieren in der natürlichen Umwelt eine Reihe zusätzlicher Informationsquellen, die Auskunft über die Fahrgeschwindigkeit geben können:

- Beim „realen“ Fahrradfahren findet eine tatsächliche Bewegung des Fahrrades im Raum statt. Damit stehen dem Fahrradfahrer auch vestibuläre Informationen über seine Fortbewegung zur Verfügung. Welche Bedeutung diesem Faktor bei der Wahrnehmung der Fahrgeschwindigkeit zukommt ist unklar, da mit Hilfe des Vestibularsystems nur Beschleunigungen oberhalb einer Schwelle und keine gleichförmigen Geschwindigkeiten wahrgenommen werden können.
- Vor allem bei Kurvenfahrten, aber auch beim Geradeausfahren wirken Kräfte (Zentrifugal- und Tangentialkräfte) auf den menschlichen Körper, die in der vorliegenden Installation des Fahrradsimulators nicht berücksichtigt werden. Sowohl das vestibuläre System als auch Sensoren im Gewebe (Niere, Blutgefäße, siehe Mittelstaedt, Mittelstaedt, 1997; Vaitl, Mittelstaedt, Baisch, 1997; Mittelstaedt, 1999) könnten die Gesamtheit dieser Informationen zur Bestimmung der Raumlage und eventuell der Geschwindigkeit verwenden.
- Obwohl es sich bei der Visualisierung um den am weitesten entwickelten Bereich in VR-Simulationsanlagen handelt, ist der Informationsgehalt und die Qualität der visuellen Simulation im Vergleich zur Situation, die wir in der natürlichen Umgebung antreffen, vergleichsweise gering.

- Je nach Fahrsituation kann auch die Amplitude und Frequenz der Vibrationen des Fahrrades Auskunft über die Fahrgeschwindigkeit geben. Allerdings setzt eine erfolgreiche Auswertung dieser Informationsquelle die Kenntnis der Beschaffenheit der Straßenoberfläche voraus. Zum Erwerb dieser Kenntnis bedarf es aber der Auswertung von Informationen aus anderen Sinneskanälen (z.B. visuell).
- Die Reibungseffekte zwischen Straße und Reifen sowie Luft und Reifen verursachen Fahrgeräusche, deren Amplitude und Frequenz mit der Fahrgeschwindigkeit korreliert sind. Auch in diesem Fall ist das Erkennen der Beschaffenheit der Straßenoberfläche durch Informationen aus anderen Sinneskanälen (visuell, Vibration) Voraussetzung, um eine adäquate Bewertung der Geschwindigkeit durch die Fahrgeräusche durchführen zu können.

Die beiden letzt genannten Punkte geben einen interessanten Einblick in die Thematik multi-modaler Wahrnehmung. In beiden Fällen bieten die jeweiligen Informationsquellen ein relatives Maß für die Geschwindigkeit, sie können aber nicht zur Bestimmung der absoluten Geschwindigkeit herangezogen werden.

Die gezielte Untersuchung der Grundlagen der Integration von mehreren Informationen bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung hat bisher im allgemeinen wenig Beachtung gefunden. Unabhängig davon, ob eine oder mehrere Informationsquellen simuliert werden empfiehlt es sich zunächst den Einfluss der dominanten Informationsquelle zu betrachten, bevor man nachfolgend den Einfluss der verbleibenden Informationsquellen und schließlich die Integration mehrerer Informationen untersucht.

3. In der ersten Phase des Aufbaus des Fahrradsimulators hatten wir uns auf die Implementierung des visuellen Kanals konzentriert. Deshalb sahen wir es als naheliegend an, uns auch zunächst auf die Untersuchung des Einflusses visueller Aspekte auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung zu konzentrieren. Ein weiterer Grund für eine Fokussierung auf die Untersuchung des Einflusses visueller Faktoren liegt darin, dass die Implementierung nicht-visueller Informationsquellen in Simulatoren bis dato noch in den Kinderschuhen steckt, eine Tatsache, die wiederum einen vermehrten Aufwand an Zeit und Geld bedingt. Für eine bevorzugte Untersuchung visueller Faktoren sprach natürlich auch die Expertise unserer Arbeitsgruppe im Bereich der visuellen Wahrnehmung.

6.3 Visuelle Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung

Welche Möglichkeiten hat das visuelle System die Geschwindigkeit der Eigenbewegung zu bestimmen?

1. Die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung erfolgt durch Analyse und/oder Integration der Vektoren des optischen Flussfeldes. Die wahrgenommene Geschwindigkeit berechnet sich in diesem Fall als Quotient aus zeitlicher und räumlicher Frequenz eines Musters.²¹ Modelle zur Erklärung der Bewegungswahrnehmung gehen davon aus, dass die Auswertung der Bewegungsinformation in sehr frühen Stufen der Informationsverarbeitung durchgeführt wird (McKee, Silverman, Nakayama, 1986, Movshon, Newsome, Gizzi, Levitt, 1986; Pasternak, Merigan, 1994). Die Auswertung der Bewegungsinformation erfolgt dabei durch räumlich-zeitliche Integration der Ausgangssignale primärer Bewegungsdetektoren. Interessant ist, dass im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitswahrnehmung bereits in sehr frühen Stufen der Informationsverarbeitung eine Segmentierung der Bildinformation erfolgt (Verghese, Stone, 1995; Verghese, Stone, 1996). Die Bestimmung der Geschwindigkeit durch räumlich-zeitliche Integration der Informationen einzelner Bewegungsdetektoren erfordert aber die Verfügbarkeit weiterer Informationsquellen, da die genaue Zusammensetzung des optischen Flussfeldes von der relativen Lage von Blickrichtung und Bewegungsrichtung des Beobachters abhängt (Warren, Hannon, 1990; Royden, Banks, Crowell, 1993).
2. Die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung ist das Resultat einer einfachen physikalischen Berechnung. Die Geschwindigkeit berechnet sich dabei als Quotient aus der zurückgelegten Wegstrecke und der dazu benötigten Zeit. Um diese Berechnung durchführen zu können ist es notwendig, dass sowohl die zurückgelegte Wegstrecke als auch die Zeitdauer mit entsprechender Genauigkeit bestimmt werden. Alternativ könnte der Betrachter die Geschwindigkeit der Eigenbewegung über die zeitliche Frequenz eindeutig segmentierter Bereiche der Szene bestimmen. In beiden Fällen kann man von einer Beteiligung höherer (späterer) Stufen der Informationsverarbeitung ausgehen.

Wir vermuten, dass je nach Zusammensetzung der Szene beide Strategien - parallel - zum Einsatz kommen. Diese Unterteilung in zwei Strategien spiegelt sich auch in der Einteilung unserer Experimente wider. Im ersten Experiment untersuchen wir den Einfluss von Kontrast und Ortsfrequenz auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit in einer Fahrsimulation. Dabei gehen wir davon aus, dass sich die beiden Bildeigenschaften in sehr frühen Verarbeitungsstufen, d.h. auf der

²¹ Die Frage, inwieweit der Betrachter in der Lage ist die Geschwindigkeit des Musters als solche, ohne explizite Auswertung der zeitlichen Frequenz zu bestimmen, ist vielfach untersucht worden. In diesem Zusammenhang sei auf folgende Arbeiten verwiesen: Diener, Wist, Dichgans, Brandt, 1976; McKee, Silverman, Nakayama, 1986; Smith, Edgar, 1991; Chen, Bedell, Frishman, 1998; Reisbeck, Gegenfurtner, 1999; Chatziastros, Wallis, Bülthoff, 2000

Ebene der primären Bewegungsdetektoren auf die Bestimmung der Geschwindigkeit auswirken. Ein primärer Bewegungsdetektor ist per Definition aus zwei Sensoreinheiten aufgebaut, wobei die Verschaltung der Sensoreinheiten unter Berücksichtigung einer Zeitverzögerung erfolgt (Korrelationsdetektoren, Reichardt, 1957, siehe auch Abb. 14). Ein Korrelationsdetektor antwortet mit maximaler Stärke, wenn die Geschwindigkeit einer Musterbewegung mit der Größe des Quotienten aus dem Abstand der Sensoren und der Zeitverzögerung übereinstimmt.

Im zweiten Experiment untersuchen wir den Einfluss der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Der Einfluss der Gesichtsfeldgröße sollte sich auf einer späteren Verarbeitungsstufe manifestieren als der Einfluss der Bildeigenschaften, da ein Effekt, wie wir ihn erwarten, die Integration der Bewegungsinformation über größere Raumbereiche erfordert.

Im dritten Experiment beschäftigen wir uns mit dem Einfluss der Dichte von Objekten auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Die Bestimmung der Objektdichte setzt eine Segmentierung der Szene auf Objektebene voraus. Folglich vermuten wir, dass die Bestimmung der Geschwindigkeit unter diesen Bedingungen nicht durch eine Auswertung der Information primärer Bewegungsdetektoren, sondern durch Auswertung objekt-basierter Informationen erfolgt.

Sowohl die Geschwindigkeits- als auch die Bewegungswahrnehmung gehören sicherlich zu den am besten untersuchten Wahrnehmungsleistungen, wobei die Experimente zur Untersuchung der Geschwindigkeitswahrnehmung in der Mehrzahl unter Verwendung von 2D- Reizen durchgeführt wurden. Die Geschwindigkeitswahrnehmung bei der Eigenbewegung baut jedoch auf die Auswertung der Information von 3D-Flussfeldern auf und wurde bislang vergleichsweise wenig untersucht. Andere auf der Auswertung der Information des optischen Flusses basierende Wahrnehmungsleistungen sind dagegen bereits vergleichsweise gut untersucht. Es handelt sich dabei zum einem um die Bestimmung der „Time-To-Contact“²² (Schiff, Detwiler, 1979; Cavallo, Laurent, 1988; Stewart, Cutworth, Lishman, 1993; Berthelon, Mestre, 1993) und zum anderen um die Bestimmung der Bewegungsrichtung des Beobachters auf der Basis der Information des optischen Flussfeldes (Warren, Hannon, 1991; van den Berg, 1992; Crowell, Banks, Shenoy, Andersen, 1998; Warren, 1998).

Die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in 3D wurde bisher vorwiegend in „Human Factors“ Arbeiten untersucht (Triggs, 1982). Diese Untersuchungen waren an erster Stelle an einer Beschreibung der Geschwindigkeitswahrnehmung in Fahrsituationen interessiert (Semb, 1969, Evans, 1970; Osaka, 1991; Ohta et al., 1991). Nur eine vergleichsweise geringe Zahl von Untersuchungen hat sich dagegen mit den Grundlagen der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in „3D-Welten“ beschäftigt (Owen, Wolpert, Hettinger, Warren, 1984; Larish, Flach, 1990; Distler, Bülthoff, 1996; Levine, Mourant, 1996).

²² „Time-to contact“ definiert die Zeit, welche bis zu einem Zusammenstoß mit einem Objekt verbleibt.

Ziel unserer Experimente war es, einerseits Grundlagen der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in einer simulierten 3D-Umgebung zu untersuchen, andererseits sollten die Ergebnisse der Experimente auch zu einer Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung in unserem Fahrradsimulator beitragen. Als Grundlage für unsere Experimente dienten uns die Ergebnisse früherer Untersuchungen (2D-Reize).

6.4 Allgemeine Beschreibung der Versuchsdurchführung

Da sich der Ablauf der folgenden Experimente im wesentlichen gleicht, beginnen wir an dieser Stelle mit einer allgemeinen Beschreibung der Versuchsdurchführung. Einzel- und Besonderheiten der Versuchsdurchführung der jeweiligen Experimente werden dann in den betreffenden Abschnitten gesondert dargestellt.

Während eines jeden Versuchsdurchganges wurden den Versuchspersonen entweder gleichzeitig oder nacheinander zwei Fahrsimulationen präsentiert. Aufgabe der Versuchspersonen war es, per Tastendruck zu entscheiden, in welcher der beiden Simulationen die Fahrt mit höherer Geschwindigkeit dargestellt wurde (2-Interval Forced Choice Paradigm, 2-IFC). Sofern nicht anderweitig vermerkt, bestanden die Szenen aus einer Straße und der angrenzenden Grundfläche. Ein realistischer Eindruck der Straße und der Umgebung wurde durch die Verwendung entsprechend vorbereiteter Texturen erreicht. Da die Beschaffenheit der Straßenoberfläche im ersten Experiment von besonderem Interesse war, werden wir an späterer Stelle (Abschnitt 6.6.2 und 6.6.3) noch genauer auf die Eigenschaften der Straßentextur eingehen.

Eine der beiden Präsentationen, der sogenannte Standard-Reiz zeigte während eines jeden Versuchsdurchganges eine Fahrsimulation mit einer genau definierten Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des Standard-Reizes blieb während der Durchführung des gesamten Versuchsblocks unverändert. In der zweiten Fahrsimulation, dem sogenannten Test-Reiz wurde je nach Experiment eine Eigenschaft der Fahrsimulation (z.B. der Kontrast der Darstellung) verändert. Die Geschwindigkeit des Test-Reizes wurde durch ein adaptives Schwellenverfahren (Levitt, 1970) ermittelt. Bei diesem Verfahren wird die Geschwindigkeit der Fahr-Simulation durch die Entscheidung der Versuchsperson in der vorangehenden Präsentation des betreffenden Test-Reizes definiert. Hatte die Versuchsperson den Test-Reiz als sich schneller als der Standard-Reiz bewegend eingeschätzt, wurde die Geschwindigkeit des Test-Reizes in der folgenden Präsentation um einen bestimmten Betrag erniedrigt und umgekehrt. Das beschriebene Verfahren ermöglicht die Bestimmung des Punktes der subjektiven Gleichheit (PSG). Der PSG definiert diejenige Geschwindigkeit des Test-Reizes, bei welcher Test- und Standardreiz subjektiv mit der gleichen Geschwindigkeit wahrgenommen werden. Der Vergleich der objektiven Werte der Geschwindigkeit des Test-Reizes am PSG und der Geschwindigkeit des Standard-Reizes ermöglichen es Aussagen über

den Einfluss einer bestimmten Eigenschaft des Reizes auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit zu machen.

6.5 Offener vs. Geschlossener Regelkreis in Experimenten

Die Beschreibung der Versuchsdurchführung verdeutlicht, dass die Versuchspersonen keinen direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit der Fahrsimulationen hatten. In der Terminologie der biologischen Kybernetik handelt es sich bei diesen Experimenten um Untersuchungen am offenen Regelkreis (siehe Abb. 2, links). Ein geschlossener Regelkreis (siehe Abb. 2, rechts) würde die direkte Einflussnahme der Versuchsperson auf die Szene erfordern. Dies wäre beispielsweise dann gegeben, wenn die Aufgabe der Versuchsperson darin besteht, die Geschwindigkeit der Simulation mit Hilfe eines Gaspedals anzupassen, während der Versuchsleiter bestimmte Aspekte der Szene verändert.

Während sich die Neuroethologie der Fliegen bereits seit langer Zeit (Reichardt, 1973; Heisenberg & Wolf, 1984) durch einen gezielten Einsatz offener und geschlossener Regelkreise auszeichnet, erfolgt die Untersuchung menschlicher Wahrnehmung und Verhaltens zumindest unter Laborbedingungen zumeist in offenen Regelkreisen.

Ein ganzheitliches Verständnis einer Verhaltensleistung kann sicherlich nur durch Verwendung geschlossener Regelkreise erreicht werden. Allerdings erschweren geschlossene Regelkreise aufgrund ihrer hohen Komplexität die Gewährleistung gut kontrollierter experimenteller Bedingungen. Offene Regelkreise bieten dagegen eine gute Kontrolle der experimentellen Bedingungen. Sie erleichtern ferner die Interpretation der Ergebnisse, da unter diesen Bedingungen zumeist ein genau definierter Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der Szene und Veränderungen im Verhalten der Versuchsperson bestehen.

6.6 Ortsfrequenz und Kontrast

6.6.1 Einleitung

Im Alltag zeigt sich beim Auto- oder Fahrradfahren ein signifikanter Einfluss der Beschaffenheit (Struktur) der Straßenoberfläche auf die Wahrnehmung der Fahrgeschwindigkeit. Eine Fahrt auf einer Straße mit einer glatten Oberfläche wird als langsamer als eine Fahrt auf einer Straße mit einer rauen Oberfläche wahrgenommen. Aus Sicht der Bildverarbeitung ist der Unterschied zwischen den Straßenoberflächen durch die Bildeigenschaften „Kontrast“ und „Ortsfrequenz“ definiert. Die Bedeutung der beiden Begriffe ist in Abb. 7 am Beispiel von Sinus-Gittern verdeutlicht. Der Kontrast eines Bildes ergibt sich aus dem das Verhältnis der Helligkeiten von benachbarten Flächenelementen (Abb. 7, rechts). Dagegen ist die Ortsfrequenz eines Musters ein Maß für die Häufigkeit von Veränderungen der Helligkeit in einem bestimmten Raumbereich (Abb. 7, links).

In früheren Untersuchungen zur Geschwindigkeitswahrnehmung hat sich ein geringer Einfluss des Kontrastes auf die wahrgenommene Geschwindigkeit offenbart. Thompson (1982) konnte zeigen, dass bei zeitlichen Frequenzen unterhalb von 8 Hz Sinus-Gitter mit geringem Kontrast als sich langsamer bewegend als ein Gitter mit hohem Kontrast wahrgenommen wurden. In einer nachfolgenden Arbeit führten Stone & Thompson (1992) eine quantitative Bestimmung des Einflusses des Kontrasts auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Bewegung des Musters durch. Hawken, Gegenfurtner & Tang (1994) unterscheiden in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Musters zwei Wege der Verarbeitung von Bewegungsinformation. Sich schnell bewegendes Muster werden ausschließlich über den sogenannten Bewegungskanal (Livingstone, Hubel, 1987) wahrgenommen, wobei die Wahrnehmung der Geschwindigkeit nahezu unabhängig vom Kontrast ist. Dagegen werden sich langsam bewegendes Muster gleichzeitig in zwei Kanälen, einem farb- und einem helligkeitssensitiven Kanal (Bewegungskanal) verarbeitet, wobei der Farbkanal eine deutlich stärkere Kontrastabhängigkeit aufweist als der Bewegungskanal. Auch Blakemore & Snowden (1999) finden unterschiedliche Kontrastabhängigkeiten der Geschwindigkeitswahrnehmung. Bei geringen Geschwindigkeiten zeigt sich ein starker Einfluss des Kontrastes, wobei eine Zunahme des Kontrastes zu einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit führt. Bei höheren Geschwindigkeiten ist nur eine schwache Kontrastabhängigkeit zu beobachten. Oftmals kann es bei hohen Kontrasten sogar zu einem relativen Unterschätzen der Geschwindigkeit kommen.

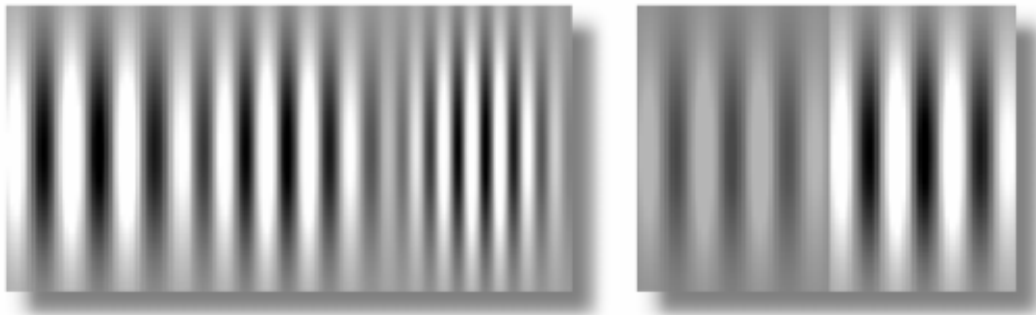


Abb. 7 Im linken Teil des Bildes sind drei Sinus-Gitter mit zunehmender räumlicher Frequenz, im rechten Teil zwei Sinus-Gitter gleicher räumlicher Frequenz, aber unterschiedlichen Kontrastes dargestellt.

Zwischen der Ortsfrequenz und der wahrgenommenen Geschwindigkeit besteht ein ähnlicher Zusammenhang wie zwischen Kontrast und wahrgenommener Geschwindigkeit. Eine Zunahme der räumlichen Frequenz eines Musters führt zu einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit des Musters (Diener, Wist, Dichgans, Brandt, 1976). Für Rotationsbewegungen beobachteten Campell & Maffei (1981) eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei einer Zunahme der Ortsfrequenz des Musters von 1 nach 4 Zyklen/Grad. Eine weitere Zunahme der räumlichen Frequenz führt dann allerdings zu einer Abnahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit. Ähnlich wie McKee et al. (1986) fanden auch Ferrera & Wilson (1991) unter Verwendung zusammengesetzter Muster

(„Plaids“) eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei zunehmender räumlicher Frequenz. Auch Chen, Bedell & Frishmann (1998) stellen im Bereich 0.25-4 Zyklen/Grad eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei zunehmender räumlicher Frequenz fest. Abweichend von den Ergebnissen aller anderen Untersuchungen fanden Smith & Edgar (1991) eine Abnahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei zunehmender räumlicher Frequenz.

Alle vorgenannten Experimente haben zur Untersuchung der Geschwindigkeit ausnahmslos 2D Muster (Sinusstreifen, Linien, Punkte) verwendet. Bevorzugtes Testmuster waren die in Abb. 7 dargestellten Sinus-Gitter. Bei Verwendung dieser Muster hat der Versuchsleiter eine sehr gute Kontrolle über die Ortsfrequenz und den Kontrast der Muster. Zudem bewegten sich die Muster in der Bildebene, d.h. die Muster haben sich senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters bewegt. Eine derartige Bewegung deckt sich eher mit der Bewegung eines Objektes als mit dem optischen Flussfeld, welches bei der Eigenbewegung des Beobachters in einer Fahrsimulation erzeugt wird.

Die Ergebnisse früherer Untersuchungen lassen offen, inwieweit sich Kontrast und die Verteilung der Ortsfrequenzen auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit in einer realistischen 3D-Szene auswirken. Die Untersuchung dieses Zusammenhangs war das Ziel unseres ersten Experimentes. Während die Bestimmung des Kontrastes und der Ortsfrequenz der in Abb. 7 dargestellten Muster keine Probleme bereitet, gestaltet sich die Bestimmung der beiden Parameter in einer Fahrsimulationsszene (siehe Abb. 8) wesentlich schwieriger (siehe hierzu Abb. 11 und Abb. 12).

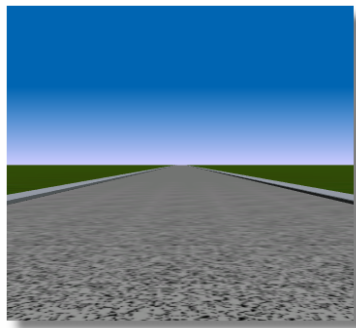


Abb. 8 Erscheinungsbild einer Fahrsimulationsszene

6.6.2 Versuchsdurchführung

Das Experiment wurde in der ersten Generation der Simulationsanlage (siehe Anhang A) durchgeführt. Vor Beginn des Versuches wurden die Versuchspersonen für eine Dauer von fünf Minuten einer Dunkeladaptation unterzogen. Den Versuchspersonen wurden in jedem Versuchsdurchgang gleichzeitig zwei Fahrsimulationsszenen präsentiert (Abb. 9). Die Szenen wurden mit Hilfe einer Silicon Graphics™ RealityEngine2 generiert und mittels eines CRT-Projektors auf

einer 2.5x2m großen Leinwand dargestellt. Die Versuchspersonen nahmen im Abstand von 2.7m von der Leinwand auf einem Stuhl Platz, woraus sich eine Größe des simulierten Gesichtsfeldes von 50x40° ergibt. Die Augenhöhe jeder Versuchsperson wurde auf eine Höhe von 1.25m eingestellt, wobei dieser Wert der simulierten Augenhöhe entsprach. Die Auflösung des Gesamtbildes betrug 1280x1024 Pixel bei einer Bildwiederholrate von 60 Hz.

Insgesamt nahmen sechs Versuchspersonen am Experiment teil. Jede Versuchsperson führte einen Block des Experimentes zur Eingewöhnung durch. Anschließend wiederholten die Versuchspersonen den experimentellen Block fünfmal. Das Kriterium für die erfolgreiche Beendigung eines Blocks bestand im Erreichen von sechs Umkehrungen des adaptiven Verfahrens („Staircase“).

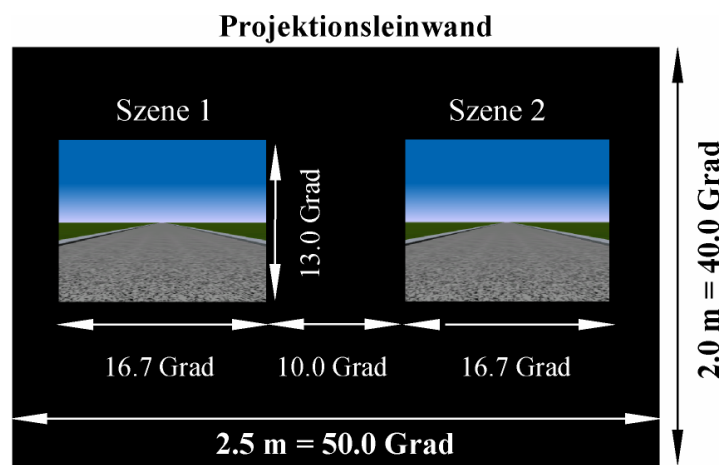


Abb. 9 Schematische Darstellung des Erscheinungsbildes der beiden gleichzeitig präsentierten Fahrsimulationen im ersten Experiment (siehe Text).

Die simulierte Szene bestand aus einer Straße, die an beiden Seiten von Wiesenflächen flankiert wurde. Um den Einfluss von Kontrast und räumlicher Frequenz auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung zu untersuchen, haben wir drei Straßenoberflächen mit unterschiedlichem Erscheinungsbild verwendet. Die Straßenoberfläche des Standard-Reizes basierte auf einem Bild mit einer Dichte der schwarzen Punkte von 10% (Abb. 10, T1). Die Position (links oder rechts) des Standard-Reizes wurde unter Berücksichtigung einer Gleichverteilung zufällig gewählt. Die drei Test-Reize basierten auf Bildvorlagen mit 10% (Abb. 10, T1), 20% (Abb. 10, T2) und 30% (Abb. 10, T3) Dichte der schwarzen Punkte. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, welche der beiden Simulationen die Fahrt mit höherer Geschwindigkeit darstellte. Die Präsentationsdauer betrug 1.5s. Die Versuchspersonen wurden angewiesen ihre Entscheidung erst nach Beendigung der Präsentation zu treffen. In der Pause (1.5s) zwischen zwei Präsentationen wurde ein gleichmäßig dunkler Hintergrund dargestellt. Den Einfluss des Kontrastes und der räumlichen Frequenz des Musters haben wir bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten 7m/s (25.2 km/h), 14m/s (50.4 km/h) und 21m/s (75.6 km/h) des Standard-Reizes getestet.

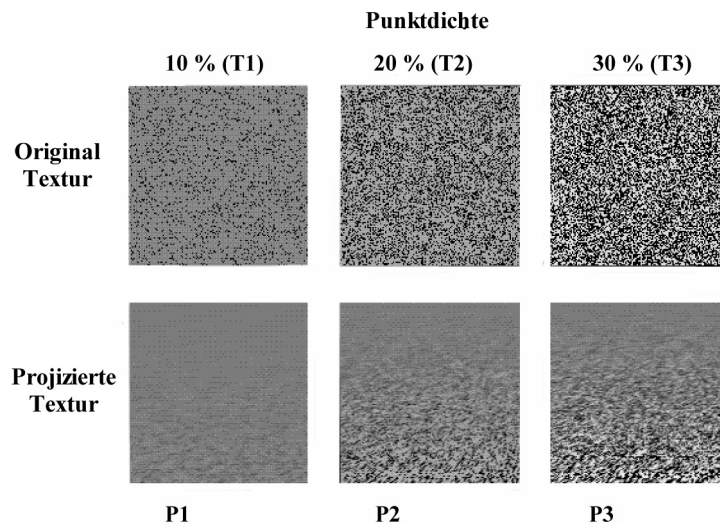


Abb. 10 In der oberen Reihe sind Originalaufnahmen der Bilder dargestellt, die wir zum Texturieren der Straßenpolygone verwendet haben (T1-T3). Die digitalen Schnappschüsse P1-P3 zeigen das tatsächliche Erscheinungsbild der Straßenoberfläche in der Fahrsimulation nach dem Durchführen der perspektivischen Projektion.

Beim Texturieren werden die als Grundlage dienenden Bilder (2D, Abb. 10, T1-T3) auf Polygonflächen abgebildet. Das 3D-Modell der Straße wird dann unter Berücksichtigung der Position und Orientierung des Betrachters mittels perspektivischer Projektion auf dem Bildschirm dargestellt (3D, Abb. 10, P1-P3). Während die Ortsfrequenz und der Kontrast der Straßen-Texturen (Bilder) noch gut definiert sind, kommt es durch die Verwendung der perspektivischen Projektion zu einer Veränderung des Frequenzspektrums der dargestellten Szene (siehe Abschnitt 6.6.3). Die Verwendung perspektivischer Projektion bedingt des weiteren, dass eine translatorische Bewegung konstanter Geschwindigkeit zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Bildpunkte in der Projektionsebene führt. Während in Bildschirmbereichen, die weit entfernte Strukturen abbilden, vergleichsweise kleine Bewegungen in der Bildebene zu beobachten sind, wird die Geschwindigkeit der Bildpunkte um so höher je geringer die Entfernung der Strukturen vom Betrachter.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen einer Fahrsimulationen und den Mustern früherer Experimente zur Untersuchung der Geschwindigkeitswahrnehmung ist die Aufteilung des Bildes in zwei Bereiche „Himmel“ und „Terrain“. Der Himmel hinterlässt unabhängig von der Wetterlage aufgrund seiner größeren Entfernung einen schwächeren Bewegungseindruck als das Terrain. Diese Asymmetrie kommt allerdings der Verarbeitung von Bewegungsinformation durch das Auge zugute, da die untere Hälfte des Gesichtsfeldes eine wesentlich höhere Bewegungsempfindlichkeit als die obere Hälfte aufweist (Previc, 1990).

6.6.3 Bestimmung der Ortsfrequenz und des Kontrastes

Um eine Beziehung zwischen den Ergebnissen des Wahrnehmungsexperiments und den Bildeigenschaften „Kontrast“ und „Ortsfrequenz“ herstellen zu können, wurden die in Abb. 10 dargestellten Bilder einer Fourier-Analyse unterzogen. Bei der Fourier-Analyse wird eine komplexe Wellenform, die das Erscheinungsbild einer natürlichen Szene ergibt, in die einzelnen Komponenten zerlegt. Zur Berechnung der Verteilung der Ortsfrequenzen haben wir nachfolgend das 2D-Leistungsspektrum, d.h. die relative Häufigkeit (=Signalstärke) einzelner Frequenzen bestimmt, wobei die Berechnung unabhängig von der Orientierung der einzelnen Komponenten erfolgte. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abb. 11 dargestellt. Die 2D-Leistungsspektren wurden sowohl für die ursprünglichen Bilder (T1-T3, Abb. 11, links) als auch für die projizierten Texturen (P1-P3, Abb. 11, rechts) berechnet. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine quantitative Bestimmung des Einflusses der perspektivischen Projektion auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Eine Zunahme der Dichte der Punkte führt hier unabhängig von der räumlichen Frequenz zu einer Zunahme der Signalstärke. Dies spiegelt sich in einer Zunahme des Bildkontrastes wieder, der als die Summe der Signalstärken aller räumlichen Frequenzen definiert ist (Abb. 12, rote Quadrate). Wichtig ist, dass unter diesen Bedingungen eine Erhöhung der Punktdichte zu einer linearen Erhöhung des Kontrastes führt. Des weiteren kommt es durch eine Erhöhung der Punktdichte vor allem im höher frequenten Bereich zu einer betonten Zunahme der Signalstärke.

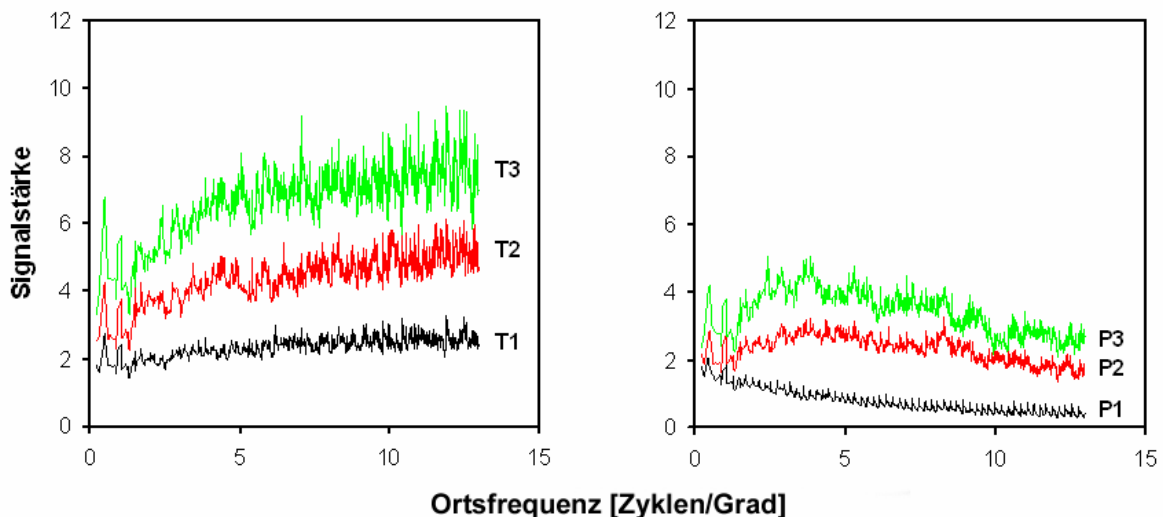


Abb. 11 Der linke Graph zeigt die Spektren der ursprünglichen Texturen (T1-T3), während der rechte Graph die Spektren der Straßenoberfläche darstellt, wie sie die Versuchspersonen in der Simulation wahrnahmen (P1-P3).

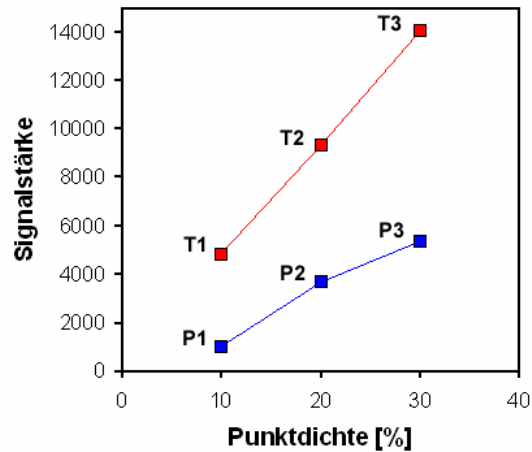


Abb. 12 Gesamt-Signalstärke (=Kontrast) in Abhängigkeit von der Punktdichte

Wie wirkt sich die perspektivische Projektion auf die Verteilung räumlicher Frequenzen und auf den Kontrast des Bildes aus? Bei Betrachtung der Kurven des 2D-Leistungsspektrums (Abb. 11, rechts) zeigt sich insgesamt ein deutlicher Rückgang der Signalstärke in den projizierten Bildern, d.h. der Kontrast der Fahrsimulation (Abb. 12, blaue Quadrate, P1-P3) ist per se signifikant geringer als der Kontrast der Originalbilder (Abb. 12, T1-T3). Im Gegensatz zur Situation bei den Originalbildern nimmt der Kontrast hier nicht länger linear mit der Dichte der schwarzen Punkte zu. Bei einer Erhöhung der Punktdichte von 20% nach 30% ist eine geringere Zunahme des Kontrastes als bei einer Erhöhung der Punktdichte von 10% nach 20% zu beobachten. Bei allen Punktdichten kommt es zu einer verstärkten Reduktion der Signalstärke im hochfrequenten Bereich (Abb. 11). Die Reduktion ist besonders bei einer geringen Punktdichte (10%) zu beobachten, während im Fall der beiden anderen Punktdichten ein lokales Maximum der Signalstärke im Bereich 3-5 Zyklen/Grad zu beobachten ist.

6.6.4 Ergebnisse und Diskussion

Die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegungen wird im weiteren Verlauf als relative Geschwindigkeit dargestellt, die sich wie folgt berechnet:

$$\text{relative Geschwindigkeit} = \frac{\text{Geschwindigkeit des Standard - Reiz}}{\text{Geschwindigkeit des Test - Reiz am PSG}}$$

Hat die relative Geschwindigkeit einen Wert von genau „1“ bedeutet dies, Test- und Standard-Reiz werden als sich gleich schnell bewegend wahrgenommen. Hat die relative Geschwindigkeit einen Wert größer als „1“, so wird die Geschwindigkeit der Test-Fahrsimulation relativ zu jener der Standard-Fahrsimulation überschätzt.

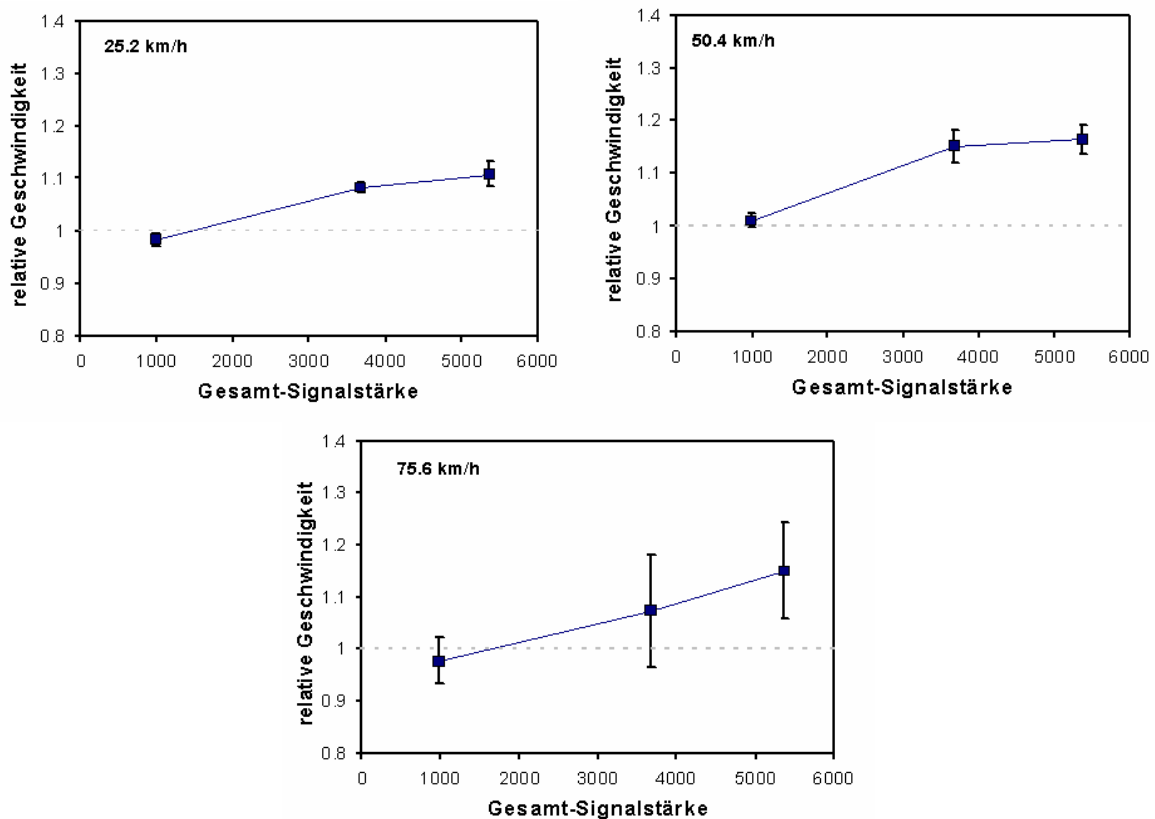


Abb. 13 Relative Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Gesamtsignalstärke für drei unterschiedliche Geschwindigkeiten des Standard-Reizes. Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert aus sechs Versuchspersonen (fünf Wiederholungen pro Versuchsperson) dar. Der linke Datenpunkt eines jeden Graphen zeigt den Wert der relativen Geschwindigkeit für den Fall, dass die Signalstärke des Standard- und des Test-Reizes gleich groß sind. Der linke Datenpunkt entspricht einer Dichte der schwarzen Punkte von 10%, der mittlere einer Dichte von 20% und der rechte Datenpunkt einer Dichte von 30%. Die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

Eine Zunahme der Gesamtsignalstärke (Abb. 13) führt zu einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Während dieser Effekt bei den ersten beiden getesteten Geschwindigkeiten des Standard-Reizes (25.2, 50.4 km/h) hoch signifikant ist (ANOVA, $F(2,10)=19.88$, $p<0.001$, 50.4 km/h: $F(2,10)=20.57$, $p<0.001$), tritt bei der dritten Geschwindigkeit (75.6 km/h) zwar ein Effekt auf, dieser ist aber aufgrund der grossen Werte der Standardfehler nicht signifikant (ANOVA, $F(2,10)=0.884$, $p>0.05$). Die stärkste Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit ist bei einer Erhöhung der Punktdichte von 10 auf 20% festzustellen, während eine weitere Erhöhung um 10% auf 30% kaum Auswirkungen hat. Vergleicht man die Ergebnisse des Experimentes zur Geschwindigkeitswahrnehmung mit den 2D-Leistungsspektren der einzelnen Straßenoberflächen, so zeigt sich, dass eine Erhöhung der wahrgenommenen Geschwindigkeit mit der Erhöhung des Kontrastes (Abb. 12, P1-P3) und einem zunehmenden Anteil der hohen Ortsfrequenzen (Abb. 11, rechts, P1-P3) korreliert ist. Für einen Übergang der Punktdichte von 10% nach 20% fallen sowohl die Änderungen im Kontrast als auch die Änderungen in der Verteilung der Ortsfrequenzen größer aus als bei einem Übergang der Punktdichte von 20% nach 30%. Damit sind die

Bildeigenschaften in guter Übereinstimmung mit der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Allerdings erschwert die Komplexität der dargestellten Straßenoberfläche eine Auftrennung des Einflusses von Kontrast und Ortsfrequenzen. Die Ergebnisse unserer Experimente bestätigen in einer 3D Umgebung den in früheren Arbeiten gefundenen Einfluss des Kontrastes und der Ortsfrequenz auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Mit zunehmendem Kontrast und mit zunehmendem Anteil hoher Ortsfrequenzen nimmt auch die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung zu.

Im Zusammenhang mit der dritten Geschwindigkeit des Standard-Reizes (75.6 km/h) beklagten sich die Versuchspersonen über ein „verschmiertes“ Erscheinungsbild der Straßenoberfläche und berichteten des weiteren, dass sich bei dieser Geschwindigkeit die wahrgenommene Bewegungsrichtung der Simulation häufig umgedreht hätte. Die Erklärung für das beobachtete Verhalten liegt im „*Temporal-Aliasing*“, dessen Grundprinzipien sich sehr einfach anhand der Eigenschaften und der Funktionsweise der Korrelationsdetektoren erklären lassen (siehe Abb. 14). Wird ein Muster bestimmter Ortsfrequenz auf dem Bildschirm immer schneller bewegt, können die Bewegungsdetektoren des Auges ab einer bestimmten Geschwindigkeit nicht mehr auflösen, ob sich das Muster vor- oder rückwärts bewegt, d.h. das Muster wird als sich nicht bewegend wahrgenommen. Bei einer weiteren Erhöhung der Geschwindigkeit dreht sich die wahrgenommene Bewegungsrichtung des Musters um. Die Geschwindigkeit wirkt sich in diesem Fall nicht nur auf die Wahrnehmung der Bewegungsrichtung und –geschwindigkeit aus, sondern führt des weiteren zu einem Rückgang des wahrgenommenen Kontrastes und der Schärfe des Bildes.

Im Vergleich zu einer realen Fahrsituation wirkt sich bei Fahrsimulationen negativ aus, dass sowohl die Erzeugung als auch die Darstellung der Szene auf diskreter Basis erfolgt, d.h. die Szene wird nur zu bestimmten Zeitpunkten neu gezeichnet. Damit handelt es sich bei der wahrgenommenen Bewegungen nicht um eine kontinuierliche, sondern um eine diskrete Bewegung („*Apparent Motion*“). Der Zeitpunkt, zu welchem sich die wahrgenommene Bewegungsrichtung einer Fahrsimulation umdreht, hängt somit nicht nur von den räumlich-zeitlichen Eigenschaften des Korrelationsdetektors ab, sondern wird zudem durch die räumlich-zeitlichen Eigenschaften der Darstellung auf dem Bildschirm oder der Leinwand bestimmt. Der Umkehrpunkt kommt bei der Darstellung von Mustern auf dem Bildschirm bei einer niedrigeren Geschwindigkeit zu liegen als in der natürlichen Umgebung.

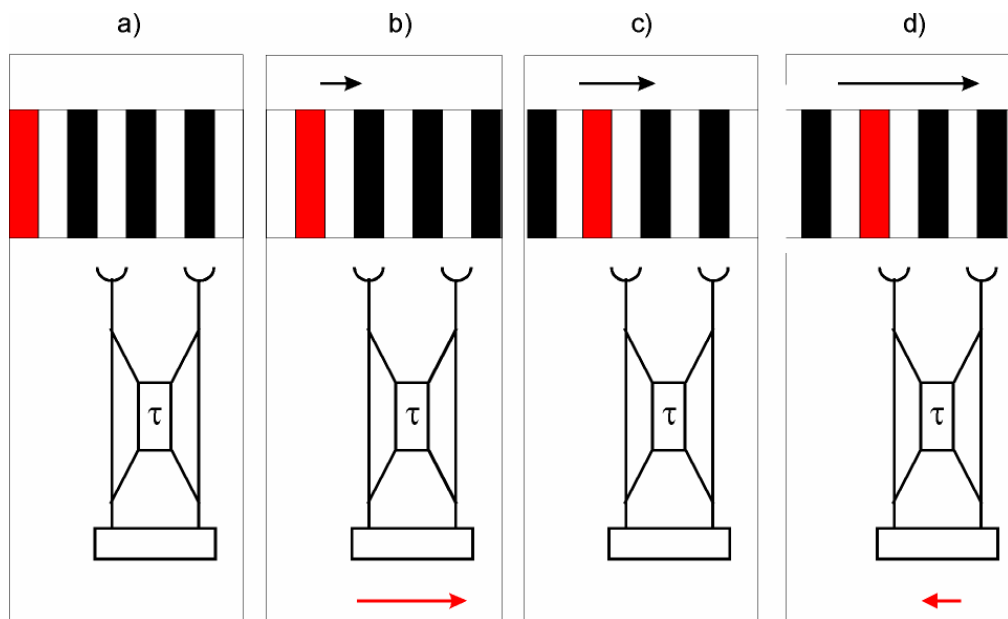


Abb. 14 Schematische Darstellung des Prinzips des Temporal-Aliasing. Im oberen Teil der Abbildung ist der Reiz, ein schwarz-weißes Streifenmuster dargestellt. Zur Verdeutlichung der momentanen Position des Musters wurde ein Streifen rot eingefärbt. Die schwarzen Pfeile symbolisieren die Bewegungsrichtung und –geschwindigkeit des Musters. Die durch das Ausgangssignal des Korrelationsdetektors (Verzögerung τ) definierte Richtung und Amplitude der „wahrgenommenen Bewegung“ ist als roter Pfeil dargestellt. In a) ist die Ausgangssituation gezeigt. Über dem linken Teil des Bewegungsdetektors befindet sich ein helles, über dem rechten Teil ein dunkles Feld. Die Positionen des Musters in b)-d) beziehen sich jeweils auf die in a) dargestellte Position. In b) wurde das Muster um exakt eine halbe Periode nach rechts verschoben, über dem linken Teil des Detektors befindet sich nun ein dunkles, über dem rechten Teil ein helles Feld. Das Ausgangssignal des Detektors zeigt die korrekte Richtung an und erreicht den für diesen Detektor charakteristischen Maximal-Wert. Wird das Muster im gleichen Zeitraum nicht nur um eine halbe, sondern um eine ganze Periode (Abb. c)) bewegt, so scheint sich das Muster aus der Sicht des Detektors nicht bewegt zu haben. Wird das Muster noch etwas weiter bewegt als in c), so ergibt sich eine Umkehrung des Ausgangssignals (siehe d)). Das Muster scheint sich, allerdings mit verminderter Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zu bewegen.

6.7 Zusatzexperiment: Einfluss des Kontrastes auf die Geschwindigkeit

6.7.1.1 Einleitung

Das erste Experiment hat einen signifikanten Einfluss des Bildkontrastes und der Verteilung räumlicher Frequenzen auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit ergeben. Allerdings war es unter den Bedingungen des Experimentes nicht möglich auf den Einfluss von Ortsfrequenz und Kontrast im Einzelnen zu schließen. Ein Blick auf die 2D-Leistungsspektren (Abb. 11) und den Kontrast der Szene (Abb. 12) eröffnet uns eine Möglichkeit den Einfluss des Kontrastes und der Ortsfrequenz getrennt zu untersuchen. Die 2D-Leistungsspektren der Originalbilder unterscheiden sich im wesentlichen in der Gesamt-Signalstärke, d.h. im Kontrast. Die Unterschiede in der Verteilung räumlicher Frequenzen sind dagegen eher minimal. Durch Betrachtung der Simulation aus der Vogelperspektive wird es möglich, den Einfluss perspektivischer Projektion auf das Frequenzspektrum weitgehend zu vermeiden. Gleichzeitig bedeutet dies, dass wir unter diesen Bedingungen den Einfluss des Kontrastes getrennt vom Einfluss der räumlichen Frequenz untersuchen können.

6.7.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung entsprach mit zwei Änderungen der Versuchsdurchführung des vorangehenden Experimentes. Die erste Änderung bestand darin, dass wir das Experiment nur mit einer (25.2 km/h) anstelle von drei Geschwindigkeiten des Standard-Reizes durchgeführt haben. Die zweite Änderung bestand darin, dass die Versuchspersonen die Fahrsimulation nicht länger aus der Position des Fahrers (Abb. 14, rechts), sondern aus der Vogelperspektive (Abb. 14, links) sahen. Die simulierte Augenhöhe des Betrachters betrug unter diesen Bedingungen 9.5m. Der Blick des Betrachters war nicht länger nach vorne, sondern senkrecht nach unten gerichtet. Die simulierte Augenhöhe war so gewählt worden, dass die Straßenränder nicht mehr sichtbar waren. Das Experiment wurde von den gleichen Versuchspersonen wie das erste Experiment durchgeführt. Genau wie im ersten Experiment wiederholte jede Versuchsperson das Experiment fünfmal.

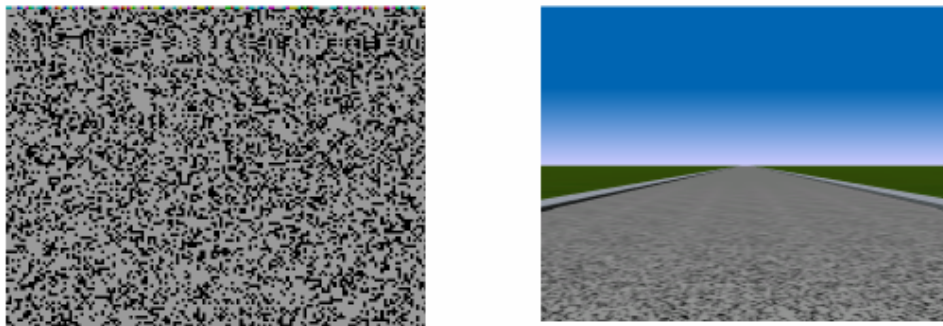


Abb. 15 Blick auf die Straße aus der Vogelperspektive (links, =2D) und aus der Sicht des Fahrers (rechts, =3D).

6.7.1.3 Ergebnis

Abb. 16 zeigt unter Berücksichtigung der Ergebnisse des vorangehenden Experimentes den Einfluss der Position und Orientierung des Betrachters auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Sowohl in der Fahrer- als auch in der Vogelperspektive-Bedingung ergibt sich ein signifikanter Einfluss der Punktdichte und somit der Signalstärke auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung (ANOVA, Vogelperspektive: $F(2,10)=4.3$, $p<0.05$; Fahrersicht $F(2,10)=19.88$, $p<0.001$). Mit Ausnahme der Punktdichte von 10% zeigt sich auch ein signifikanter Effekt der Position des Betrachters auf die wahrgenommene Geschwindigkeit (paarweise zweiseitige t-tests, 10%: $p>0.05$, 20%: $p<0.001$, 30%: $p<0.005$). Bei Punktdichten von 20% und 30% ergibt sich ein wesentlich stärkerer Einfluss der Punktdichte auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung für die „Fahrersicht“. Die genaue Bewertung des Einflusses des Kontrastes gestaltet sich schwierig, da die relative Geschwindigkeit bei einer Punktdichte von 10% einen Wert kleiner eins hat und der Wert der relativen Geschwindigkeit erst bei Punktdichten von 20% und 30% einen Wert von „1“ erreicht.

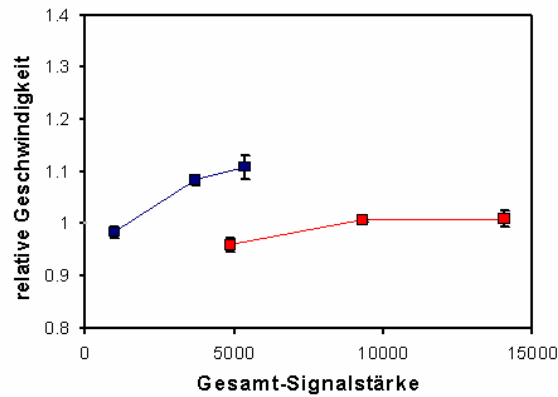


Abb. 16 Einfluss der Gesamtsignalstärke und der Betrachterposition auf die relative Geschwindigkeit. Die blauen Datenpunkte zeigen die Ergebnisse für die Sicht des Autofahrers (vorangehendes Experiment), die roten Datenpunkte für die Betrachtung der Szene aus der Vogelperspektive. Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert aus sechs Versuchspersonen (fünf Wiederholungen pro Versuchsperson) dar. Der jeweils linke Punkt einer jeden Kurve entspricht einer Dichte der schwarzen Punkte von 10%, der mittlere einer Dichte von 20% und der rechte schließlich einer Dichte von 30%. Die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

6.7.1.4 Diskussion

Auch bei Betrachtung der Simulation aus der Vogelperspektive finden wir einen signifikanten Einfluss der Punktdichte auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Da dieser Effekt jedoch weit kleiner ausfällt als bei Betrachtung der Szene aus der Sicht des Fahrers ergibt sich somit, dass in der Fahrsimulation sowohl die Änderungen des Kontrastes als auch die Änderungen der relativen Verteilung der räumlichen Frequenzen für den Einfluss der Punktdichte auf die wahrgenommene Geschwindigkeit verantwortlich sind.

6.7.2 Zusammenfassung

Die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in einer 3D-Fahrsimulation zeigt die gleiche Abhängigkeit zwischen der wahrgenommenen Geschwindigkeit und grundlegenden Bildeigenschaften wie sie bereits in früheren Arbeiten zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit von 2D-Mustern gefunden wurde. Sowohl eine Erhöhung des Kontrastes als auch eine Erhöhung des relativen Anteils hochfrequenter räumlicher Komponenten führt zu einer Erhöhung der wahrgenommenen Geschwindigkeit. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung frühe Stufen der Verarbeitung, die auf einer Auswertung der Information der primären Bewegungssensoren beruhen, eine wesentliche Rolle spielen.

Im Vergleich zu Arbeiten, die Sinus-Gitter zur Untersuchung der Geschwindigkeitswahrnehmung verwendet haben ist es bei Verwendung von optischen Flussfeldern vergleichsweise schwierig eine einfache und eindeutige Beschreibung des Kontrastes und der räumlichen Frequenz der Szene zu

finden. Streng genommen müssten beide Eigenschaften für lokal begrenzte Bildbereiche ausgewertet werden, da sich sowohl der Kontrast als auch die Ortsfrequenz eines Musters in Abhängigkeit von der Position im Gesichtsfeld ändern. Um jedoch einen verständlichen Zusammenhang zwischen den Bildeigenschaften und der wahrgenommenen Geschwindigkeit herstellen zu können, haben wir die lokalen Werte für Kontrast und Ortsfrequenz über einen großen Bildschirmbereich gemittelt.

Die möglichen Auswirkungen des Auftretens von Temporal-Aliasing sollten von Versuchsleitern, die eine Verwendung von Computer-Graphik zur Durchführung von Experimenten zur Untersuchung der Geschwindigkeitswahrnehmung der Eigenbewegung planen, bedacht werden.

6.7.3 Bedeutung der Ergebnisse für VR-Entwickler

Die Ergebnisse unserer Experimente zeigen, dass durch eine gezielte Veränderung der Ortsfrequenzen und des Kontrastes einer Szene der Geschwindigkeitseindruck verbessert werden kann. Dem Entwickler stehen mehrere Wege offen, um diese Erkenntnis umzusetzen. Zunächst kann eine derartige Verbesserung durch eine entsprechende Einstellung der Bildeigenschaften von Monitoren und Projektoren erreicht werden. Bei Projektionen spielt zudem die Wahl des Leinwandmaterials und der Leinwandform (Streulicht) noch eine besondere Rolle. Eine Verbesserung der Bildeigenschaften kann aber auch durch gezielte Manipulationen der Erzeugung der Szene sowie der 3D-Modelle erreicht werden. Ein Verzicht auf die Technik des Full-Scene-Anti-Aliasing würde zwar einerseits das Auftreten von Flickereffekten bedingen, andererseits würde aber zum einen der Kontrast der Szene verbessert und zum anderen würde es zu einer Erhöhung des relativen Anteils hoher Ortsfrequenzen kommen (siehe Abschnitt 6.7.4).

Gezielte Veränderungen der 3D-Computer-Graphikmodelle laufen im Fall von Echtzeit-Simulationen zumeist auf die Bearbeitung der Texturen hinaus. Die Durchführung dieser Manipulationen bedingt einen erhöhten Aufwand und erfordert einige Sorgfalt. Um die Ortsfrequenz und den Kontrast des Originalbildes einer Textur so zu verändern, dass am Ende der Manipulation eine optimale Geschwindigkeitswahrnehmung steht, müssen der Kontrast und die Verteilung der Ortsfrequenzen des Bildes auf der Netzhaut des Auges bestimmt werden. Dies erreicht man, indem man die simulierte Szene mit einem Fotoapparat aus der Position des Beobachters aufnimmt und nachfolgend die Eigenschaften des Bildes mit der Kontrast-Übertragungsfunktion des menschlichen Auges verrechnet. Ist anhand der 2D-Leistungsspektren der so erzeugten Abbildungen deutlich erkennbar, dass sich der Kontrast und die Verteilung der Ortsfrequenzen bestimmter Bildbereiche von den gewünschten Werten unterscheiden, kann man unter Verwendung von „Trial und Error“ versuchen das Originalbild so zu verändern, dass sich nach dem Durchlaufen der Verarbeitungskette „Texture Mapping“, perspektivischer Projektion, Digital-Analog-Umwandlung des Videosignals, Darstellung durch den Projektor und Kontrast-Übertragungsfunktion des menschlichen Auges ein optimales Erscheinungsbild der Szene hinsichtlich des Kontrastes und der Verteilung der

Ortfrequenzen ergibt. Bei Verwendung einer „Trial and Error“ Strategie sollte man allerdings beachten, dass bereits Änderungen einer einzigen Komponente der Verarbeitungskette ausreichen, um einen vorher erzielten positiven Effekt hinfällig zu machen. Alternativ zu einem Vorgehen per „Trial und Error“ kann man versuchen die Kontrast- und Frequenzeigenschaften einer jeden Komponente der Verarbeitungskette zu bestimmen. Diese Vorgehensweise führt zunächst zu einem erhöhten Aufwand, erweist sich aber im weiteren Verlauf aus zwei Gründen als vorteilhaft. Die Kenntnis der Eigenschaften der Komponenten ermöglicht die Implementierung eines „Reverse Engineering“-Verfahrens. Hiermit könnten der Kontrast und die Verteilung der Ortsfrequenzen der Originaltexturen semi-automatisch auf der Basis ihres Erscheinungsbildes in der Simulation (2D-Leistungsspektrum) angepasst werden. Ferner kann unter diesen Bedingungen dem Austausch einer Komponente verhältnismäßig schnell und einfach Rechnung getragen werden. Die beschriebene Bearbeitung der Texturen ist, wie leicht zu erkennen ist, mit einem sehr hohen Aufwand verbunden, allerdings rechtfertigt die Größe des Einflusses von Ortsfrequenz und Kontrast eines Musters auf die wahrgenommene Geschwindigkeit diesen Aufwand.

Aufgrund des Auftretens von Temporal-Aliasing darf die Bedeutung der zeitlichen Frequenz in Form der Wiederholrate des Bildschirmes, bzw. der Bildwiederholrate der Simulation nicht unterschätzt werden. Um Temporal Aliasing soweit als möglich zu vermeiden, sollte die Simulation mit einer möglichst hohen Bildwiederholrate betrieben werden.

6.7.4 Bedeutung der Ergebnisse für die Verwendung von Projektoren

Zur visuellen Darstellung virtueller Welten werden derzeit in den meisten Fahrsimulatoren CRT-Projektoren verwendet, die ein Bild auf eine mattweiße Leinwand (Lichtverstärkungsfaktor ca. 1.0) werfen. CRT-Projektoren werden anderen Projektortypen (LCD, DLP, CRT, Lichtventil) vorgezogen, da sie bei der Darstellung graphischer Datensätze das „schönste Bild“ liefern.²³ Der entscheidende Vorteil der CRT-Projektoren ist ihre Fähigkeit zur Entzerrung von Geometrien. In vielen Simulatoren kommen Leinwände mit gekrümmter Oberfläche (z.B. Zylinder) zum Einsatz. Da der Rechner die Abbildung der Szene auf Basis einer planen Projektionsebene erzeugt, muss bei Projektion der Szene auf eine gekrümmte Oberfläche die geometrische Abbildung der Szene durch den Projektor korrigiert werden. Bislang ermöglichen nur spezielle integrierte, digitale Systeme bzw. CRT-Projektoren eine derartige Entzerrung des Bildes. Die geringe Helligkeit (im Durchschnitt 230-350 ANSI-Lumen, Spitzengeräte bis 350 ANSI-Lumen) und der geringe Kontrast des Bildes der CRT-Projektoren sind allerdings hinsichtlich der Geschwindigkeitswahrnehmung von Nachteil. Im Vergleich dazu ermöglicht die Verwendung von LCD- und DLP-Projektoren die Darstellung von Bildern mit höherer Helligkeit (zwischen 1000 und 7000 ANSI-Lumen) und höherem Kontrast. Beide Eigenschaften

²³ Unter „schönsten Bild“ ist ein Bild mit sehr gleichmäßiges Helligkeitsverläufen zu verstehen. Dies ist aber nicht gleichbedeutend mit dem bestmöglichen Bild im Hinblick auf die Funktionalität der Anwendung.

führen zu einem insgesamt schärferen Erscheinungsbild der Szene. Neben dem Kontrast ist bei dieser Form der Darstellung auch der relative Anteil hoher Ortsfrequenzen erhöht. Allerdings kommt es bei diesen Projektortypen aufgrund der relativ langen Nachleuchtdauer der einzelnen Pixel bei Großfeldbewegungen zu einem Nachleuchten bewegter Objekte, das sich in Form des sogenannten „*Kometenschweif*“ bewegter Objekte äußert. Sofern sich die Simulationsteilnehmer in relativer geringer Entfernung von der Leinwand befinden können sie bei LCD-Projektoren die Pixelstruktur des Bildes erkennen. Es gibt zwar keinerlei Hinweise, dass sich das Erkennen der Pixelstruktur negativ auf die Fahrleistung der Teilnehmer auswirkt, aber aufgrund ästhetischer Erwägungen wird hier der CRT-Projektor zumeist dem LCD- oder DLP-Projektor vorgezogen.

Im folgenden wollen wir auf einige technische Aspekte von Fahrsimulatoren eingehen, die einerseits einen signifikanten Kostenfaktor darstellen, sich aber andererseits negativ auf den Kontrast des Bildes auswirken. Im technischen Sinne wird die Darstellung bzw. Darstellbarkeit eines Bildes durch zwei Richtwerte der Projektoren, die horizontale Abtastfrequenz und die Bandbreite des Signals charakterisiert. Die horizontale Abtastfrequenz des Projektors berechnet sich dabei wie folgt:

$$\text{horizontale Abtastfrequenz} = \text{vertikale Bildschirmauflösung} * \text{Bildwiederholrate}$$

Beispielsweise beträgt die horizontale Abtastfrequenz bei einer Auflösung von 1280x1024 Pixeln und einer Bildwiederholrate von 75 Hz 76.8 kHz. Für die Darstellbarkeit des Bildes ist entscheidend, dass der Wert der horizontalen Abtastfrequenz des Projektors größer als der betreffende Wert des darzustellenden Videosignals ist. Tritt der umgekehrte Fall ein, kann das Bild durch den jeweiligen Projektor nicht dargestellt werden. Im Gegensatz zur horizontalen Abtastfrequenz darf die Bandbreite des Videosignals die Bandbreite des Projektors übersteigen, ohne dass dies dazu führt, dass das Bild nicht mehr dargestellt werden kann. Die Bandbreite eines Videosignals berechnet sich wie folgt:

$$\text{Bandbreite} = 1.5 * \text{horizontale Bildschirmauflösung} * \text{vertikale Bildschirmauflösung} * \text{Bildwiederholrate}$$

Die Bandbreite eines Bildes mit einer Auflösung von 1280x1024 Pixeln (75 Hz) beträgt demnach ungefähr 148 MHz. Die Bandbreite der meisten heute verwendeten Projektoren beträgt aber nur 120 MHz. Es kommt unter diesen Bedingungen zu einer Verringerung des Kontrastes, der Schärfe und der Farbqualität der Abbildung. Die graphischen Supercomputer der Firma Silicon Graphics™ sind in der Lage Videosignale mit einer Auflösung von 1280x1024 bei 120 Hz (aktive Stereoverfahren) zu erzeugen. Dieses Signal hat eine Bandbreite von 236 MHz. Damit ist bei Verwendung eines aktiven Stereoverfahrens (LCD-Shutterglases) die Bandbreite des Signals um den Faktor zwei größer als die Bandbreite des Projektors.

Beim Erwerb einer Graphikkarte spielt neben der Frage nach der maximal möglichen Auflösung die Fähigkeit der Graphikkarte Full-Scene-Anti-Aliasing durchzuführen eine entscheidende Rolle. Bei Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing wird die Szene virtuell (intern) mit einer höheren

Auflösung berechnet. Nachfolgend werden die RGB-Werte benachbarter Pixel gegeneinander abgeglichen, um so einen kontinuierlichen Übergang zwischen den einzelnen Strukturen einer Szene zu erzeugen. Die Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing führt zwar einerseits zu einer subjektiven Verbesserung der Qualität der Darstellung eines Bildes, andererseits verringert die Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing aber den Kontrast und die Schärfe des Bildes. Allerdings gibt es gute Gründe für eine Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing. Bei geringen Auflösungen der Graphik des Rechners verhindert Full-Scene-Anti-Aliasing, dass es beim simulierten Näherkommen des Beobachters bei weit entfernten Objekten zu Flickereffekten kommt. Das Flickern kommt zustande, da weit entfernte Objekte je nach Blickwinkel, Beschaffenheit der umliegenden Objekte eine Größe zwischen 0 und 1 Pixel einnehmen. Da im Bereich von 0.5 Pixel kleine Schwankungen darüber entscheiden, ob das Objekt sichtbar ist (1 Pixel), wechselt die Sichtbarkeit der Objekte ständig. Ein bekanntes Beispiel ist das Flickern von quer zur Fahrtrichtung verlaufenden Straßen. Full-Scene-Anti-Aliasing verhindert bzw. vermindert das Flickern, indem die Helligkeits- und Farbwerte benachbarter Strukturen der Szene auf Subpixelebene gegeneinander abgeglichen werden.

Full-Scene-Anti-Aliasing ist also einerseits notwendig ist, um Flickereffekte bei der Darstellung einer Szene zu unterdrücken, andererseits aber führt es zu einer Verringerung des Kontrastes und der Schärfe des dargestellten Bildes. Die Problematik könnte nur gelöst werden, indem das Anti-Aliasing durch einen Algorithmus ersetzt wird, der eine selektive Bearbeitung jener Bildbereiche erlaubt, in welchen es zu kritischen Übergängen in der Pixelgröße von Objekten kommt.

Sowohl die Auflösung der Graphik als auch die Möglichkeit der Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing stellen signifikante Kostenfaktoren beim Kauf eines graphischen Simulationsrechners dar. Gerade im Fall der Auflösung wird heute oft in Eigenschaften von Geräten investiert, die bei Einbindung des Gerätes in das Gesamtsystem nicht zur Geltung kommen oder gar zu einer Verschlechterung bestimmter Aspekte des Systems führen. Die vermeintlich besten Einzellösungen (hoch auflösende Graphikkarte, etc.) führen also in der Gesamtheit des Systems nicht immer zur besten Gesamtlösung. Weniger ist manchmal besser. Die eingesparten Kosten können dann an anderer Stelle eingesetzt werden, um die Qualität der Simulation zu verbessern. Leider sind die Entwickler von Fahrsimulatoren heute häufig darauf angewiesen Techniken und Technologien zu verwenden, die sich wie im Fall des Full-Scene-Anit-Aliasing beschrieben negativ auf bestimmte Eigenschaften des Simulators auswirken, aber auf der anderen Seite notwendig sind, um andere negative Effekte zu vermeiden. An dieser Stelle kann nur die zielgerichtete Entwicklung von Algorithmen und Technologien weiterhelfen, die einerseits die ästhetischen Bedürfnisse des Breitenmarktes befriedigt, aber gleichzeitig die funktionalen Aspekte einer Darstellung berücksichtigt.

6.8 Größe des Gesichtsfeldes

6.8.1 Ausgangssituation

Im Zuge der Umrüstung von der ersten zur zweiten Generation des Fahrrad-Simulators (Anhang A) wurde die Größe des horizontalen Gesichtsfeldes von 50° auf 180° und die Größe des vertikalen Gesichtsfeldes von 40° auf 50° erweitert. In ersten Tests der neuen Simulationsanlage bestätigten Simulationsteilnehmer eine Erhöhung der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Eigenbewegung aus subjektiver Sicht. Um den Einfluss der horizontalen Größe des Gesichtsfeldes auf die wahrgenommene Geschwindigkeit systematisch zu untersuchen, haben wir unseren Versuchspersonen Fahrsimulationen mit unterschiedlichen Größen des horizontalen Gesichtsfeldes präsentiert (siehe auch Van Veen Distler, Braun, Bühlhoff, 1998).

6.8.2 Einleitung

Ein Bewegungsdetektor verarbeitet nur in einem eng umgrenzten räumlichen Bereich Bewegungsinformation. Zur Auswertung der Information des optischen Flusses des gesamten Gesichtsfeldes müssen die Ausgangssignale der einzelnen Bewegungsdetektoren über größere räumliche Bereiche integriert werden. Die Notwendigkeit der Integration ergibt sich nicht nur aufgrund der räumlich begrenzten Ausdehnung der Bewegungssensoren, sondern auch deshalb, weil sich die einzelnen Detektoren in ihren räumlich-zeitlichen Eigenschaften unterscheiden. Innerhalb eines bestimmten Raumbereiches befinden sich Bewegungsdetektoren mit unterschiedlichster Sensitivität hinsichtlich der optimalen Geschwindigkeit der Bewegung eines Reizes. Im Zuge des Integrationsprozesses werden die Signale der einzelnen Bewegungsdetektoren über größere Raumbereiche in Form einer Mittelwertbildung kombiniert (Watamaniuk, Duchon, 1992). Je nach zugrundeliegender Modellvorstellung sollte es bei einer Zunahme der Größe des Gesichtsfeldes entweder zu einer Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und/oder zu einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit kommen.

Der Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes wurde bereits für eine Reihe von Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen, die im Zusammenhang mit Wahrnehmung der Eigenbewegung stehen, untersucht (siehe Wolpert, 1990). Bei simulierten Landeanflügen in einem Flugsimulator ergab sich ein enger Zusammenhang zwischen der Größe des Gesichtsfeldes und Komplexität der Szene (Kraft, Anderson, Elworth, 1980). In komplexen Szenen zeigten die Piloten bei großem Gesichtsfeld eine bessere Leistung hinsichtlich des Erreichens einer vorgegebenen Höhe. Allerdings führte ein größeres Gesichtsfeld bei Verwendung einer einfachen Szene zu dem gegenteiligen Effekt. Auch Hubschrauberpiloten bzw. Piloten von Flugzeugen, die auf kleinstem Raum landen müssen profitieren von einem größeren Gesichtsfeld (Breul, 19881). Chatziastros, Wallis & Bühlhoff (1999) fanden hingegen nur einen schwachen Einfluss der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes (40° - 180°) auf die

Genauigkeit der Spurhaltung in einem Fahrsimulator.

Osaka (1998) hat den Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung beim Fahren auf einer Autobahn untersucht. Sowohl bei Tag- als auch bei Nachtfahrten zeigt sich eine Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit, wenn die Größe des Gesichtsfeldes von 3° auf bis zu 55° erweitert wird. Änderungen der Größe des Gesichtsfeldes hatten bei Nachtfahrten einen stärkeren Effekt als bei Tagfahrten. Die von Osaka verwendeten Größen des Gesichtsfeldes lagen zumindest im Fall des horizontalen Gesichtsfeldes weit unterhalb der maximal möglichen Größe des horizontalen Gesichtsfeldes unserer Simulationsanlage.

6.8.3 Versuchsdurchführung

Das Experiment wurde in der zweiten Generation der Simulationsanlage durchgeführt (siehe Anhang A, kegelstumpfförmige Leinwand, Gesichtsfeld $180 \times 50^\circ$). Die Versuchspersonen nahmen auf einem Stuhl im Zentrum der Leinwand Platz. Die Höhe des Stuhls wurde so angepasst, dass die Augenhöhe der Versuchsperson 1.25m war, was der simulierten Augenhöhe entspricht.

In einem 2-IFC-Paradigma wurden den Versuchspersonen nacheinander zwei Fahrsimulationen präsentiert. Die Szene bestand im Gegensatz zum ersten Experiment nicht aus einer Straße und umgebenden Wiesenflächen, sondern die Szene baute sich auf der Darstellung einer einzigen Grundfläche auf. Aufgrund der Ergebnisse des vorangehenden Experimentes haben wir die Grundfläche mit einer Textur belegt, deren Dichte der schwarzen Punkte 20% betrug (Abb. 10, oben Mitte). Des Weiteren wurden die Texturkoordinaten entsprechend der Einstellungen des ersten Experimentes gewählt.

Die Präsentationsdauer von Standard und Test-Reiz betrug je zwei Sekunden. In der Zeit zwischen zwei Präsentationen wurde für die Dauer von 1.5s ein gleichmäßig dunkelgrauer Hintergrund dargestellt. Nach der Präsentation des homogenen Hintergrundes erschien für 500ms ein Fixationszeichen (Kreuz in Höhe des Horizontes). Während dieser Zeit wurde die Szene langsam eingeblendet. 200ms nach dem Verschwinden des Fixationszeichens setzte die simulierte Bewegung ein. Vor der ersten Präsentation eines Paares hatte das Fixationszeichen eine rote Farbe, vor der zweiten Präsentation war es gelb eingefärbt. Die Versuchspersonen wurden angewiesen während der gesamten Dauer der Präsentation in Richtung der virtuellen Position des Fixationszeichens zu blicken. Nach der zweiten Präsentation eines Paares erschien auf dem Bildschirm eine Aufforderung an die Versuchspersonen per Tastendruck zu entscheiden, welche der beiden Präsentationen die Fahrsimulation höherer Geschwindigkeit dargestellt hatte.

Die Größe des horizontalen Gesichtsfeldes des Standard-Reizes betrug 73° , während die Größe des Gesichtsfeldes im Test-Reiz die folgenden vier Werte annehmen konnte: 37° , 73° , 107° und 180° . Die simulierte Fahrgeschwindigkeit des Standard-Reizes lag bei 7.0m/s (25.2 km/h). Die Reihenfolge von Standard- und Test-Fahrsimulation wurde zufällig gewählt, wobei die Verteilung der Reihenfolge

einer Gleichverteilung folgte.

Vier Versuchspersonen nahmen am Experiment teil, wobei jede Versuchsperson das Experiment viermal wiederholte. Die Daten des ersten Blockes wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Innerhalb eines Blockes bestand das Kriterium zum Beenden im Erreichen von 12 Umkehrungen des adaptiven Verfahrens. Das Experiment wurde in insgesamt vier Sitzungen durchgeführt, wobei pro Sitzung ein Block ausgeführt wurde. Die Gesamtdauer des Experimentes betrug je nach Konformität der Antworten der Versuchspersonen zwischen vier und fünf Stunden.

6.8.4 Ergebnis

Es zeigt sich ein schwacher, aber signifikanter Effekt (ANOVA, $F(3,9)=4.351$, $p<0.05$) der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung (Abb. 17). Der Effekt äußert sich in einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei einer Zunahme der Größe des Gesichtsfeldes. Die Ergebnisse paarweiser t-Tests verdeutlichen, dass der Gesamteffekt durch eine Zunahme der Größe des Gesichtsfeldes von 73° nach 107° ($p<0.005$) bedingt wird. Dagegen führt weder eine Zunahme der Größe des Gesichtsfeldes von 37° nach 73° ($p>0.05$) noch eine Zunahme von 107° nach 180° ($p>0.05$) zu einer signifikanten Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Eigenbewegung.

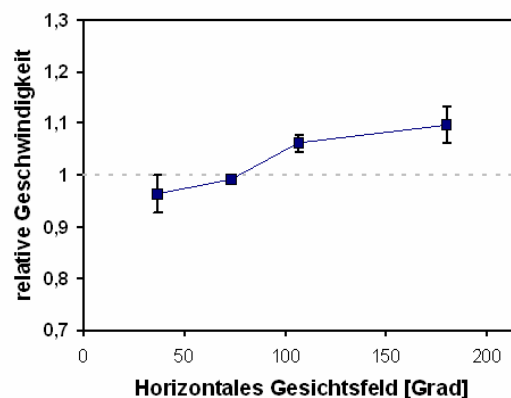


Abb. 17 Relative Geschwindigkeit des Test-Reizes am PSG in Abhängigkeit von der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes. Jeder Datenpunkt entspricht dem Mittelwert von vier Versuchspersonen, wobei jede Versuchsperson das Experiment dreimal wiederholte. Die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

Werden die relativen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Präsentation aufgetragen (Abb. 18), zeigt sich ein deutlicher Effekt der Reihenfolge der Präsentation auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Wird der Test-Reiz nach dem Standard-Reiz präsentiert, überschätzen die Versuchspersonen die relative Geschwindigkeit des Test-Reizes und umgekehrt. Diese Beobachtung lässt auf einen Gedächtniseffekt bei der Wahrnehmung der

Geschwindigkeit schließen. Mit zunehmender Zeitdauer verringert sich die „erinnerte Geschwindigkeit“.

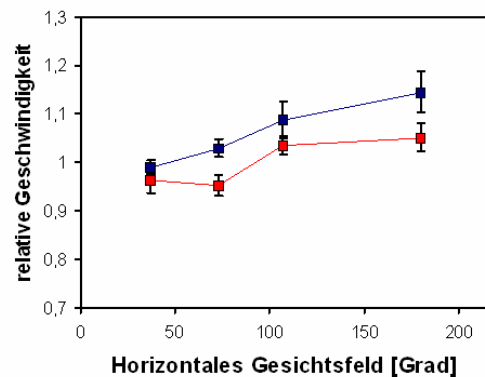


Abb. 18 Einfluss der Reihenfolge der Präsentation auf die relative Geschwindigkeit. Die blauen Datenpunkte zeigen die Ergebnisse der Durchgänge, in welchen der Test- nach dem Standard-Reiz präsentiert wurde. Im Fall der roten Datenpunkte wurde der Test- vor dem Standard-Reiz präsentiert.

6.8.5 Diskussion

Die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung nimmt mit zunehmender Größe des horizontalen Gesichtsfeldes zu. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse beschränkt sich der Effekt auf eine Zunahme der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes von 73° nach 107° . Dies könnte die Schlussfolgerung nahe legen, dass man beim Bau eines Fahrsimulators eine Mindestgröße der horizontalen Größe des Gesichtsfeldes von 90° - 100° benötigt. Eine zusätzliche Erweiterung der Größe des Gesichtsfeldes scheint zumindest hinsichtlich der Geschwindigkeitswahrnehmung keine weiteren Auswirkungen zu verursachen. Eine solche Schlussfolgerung wäre aber voreilig, da die vorliegenden Ergebnisse unter Verwendung einer sehr einfacher Szenen gewonnen wurden. Bei Verwendung von Szenen hoher Komplexität ist denkbar, dass die Abhängigkeit zwischen Gesichtsfeldgröße und wahrgenommener Geschwindigkeit noch von zusätzlichen Faktoren beeinflusst wird.

Ein wichtiger Aspekt, der bis dato in den meisten Simulatoren sowie auch in den Untersuchungen der visuellen Wahrnehmung kaum Beachtung gefunden hat, ist die Größe des vertikalen Gesichtsfeldes. Gerade bei einer Fortbewegung zu Fuß oder mit dem Fahrrad kann der Betrachter die optischen Flussfelder im unteren Gesichtsfeldbereich direkt einsehen. Aufgrund des vergleichsweise geringen Abstandes zwischen Auge und Boden erhält man in diesem Bereich Flussvektoren mit größeren Amplituden als bei einer Erweiterung der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes zu beobachten ist. Bei Fahrsimulatoren im Sinne von Auto-Simulationen dürfte die Größe des vertikalen Gesichtsfeldes allerdings von geringerer Bedeutung sein, da bei einem Auto der vertikale Sichtbereich durch natürliche Verdeckungen bereits stark eingeschränkt wird.

6.9 Einfluss der Dichte von Objekten auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit

6.9.1 Einleitung

Vielen Autofahrern ist die folgende Beobachtung wohl vertraut. Fährt man mit konstanter Geschwindigkeit entlang einer Allee deren Baumdichte sich kontinuierlich ändert, so stellt man fest, dass die wahrgenommene Fahrgeschwindigkeit mit der Dichte der Bäume korreliert. Je höher die Dichte der Bäume, desto höher auch die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Das visuelle System operiert hier im weitesten Sinn als Frequenzzähler, d.h. die Geschwindigkeit der Eigenbewegung wird bestimmt, indem die Zahl der Bäume, die pro Zeiteinheit einen bestimmten Punkt im Gesichtsfeld passieren, ausgewertet werden (zeitliche Frequenz).

In der Literatur wird die Frequenz mit welcher erkennbare Diskontinuitäten einen bestimmten Punkt im Gesichtsfeld passieren als *Edge-Rate* bezeichnet (Warren, 1982, Larish, Flach, 1990). Kennzeichnend für die Edge-Rate ist ihre Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Bewegung des Betrachters und der Dichte der Diskontinuitäten. Die Augenhöhe des Betrachters über Boden hat dagegen keinen Einfluss auf die Edge-Rate. Genau umgekehrt gestalten sich die Abhängigkeiten im Fall der „Global Optic Flow-Rate“ (Warren, 1982). Dieser Faktor definiert die Winkelgeschwindigkeit eines Punktes im Gesichtsfeld des Betrachters in Abhängigkeit von der Augenhöhe. Der genaue Wert dieses Faktors hängt von der Geschwindigkeit und der Augenhöhe des Betrachters ab, ist aber unabhängig von den Eigenschaften der Szene (Textur). Untersuchungen haben gezeigt, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung durch beide Faktoren beeinflusst wird. Allerdings übt die „Edge-Rate“ einen wesentlich stärkeren Einfluss als die „Global Optic Flow-Rate“ auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung aus (Larish et al., 1990; Owen, Wolpert, Hettlinger, Warren, 1984). Gleichzeitig nimmt die Auswertung der Edge-Rate aber auch mehr Zeit in Anspruch als die Bestimmung der „Global Optic Flow-Rate“ (Owen, Wolpert, Warren, 1984). Der Grund hierfür liegt vermutlich in der Notwendigkeit der Erkennung von Diskontinuitäten, d.h. die Auswertung der Edge-Rate setzt eine Segmentierung der Szene voraus. Zwar gibt es Hinweise, dass bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit die Segmentierung der Szene in sehr frühen Stufen der Informationsverarbeitung erfolgen kann (Verghese, Stone, 1995, Verghese, Stone, 1996), wir glauben jedoch, dass vor allem bei der Verwendung realistisch erscheinender Szenen Objekterkennung und damit vergleichsweise späte Stufen der Informationsverarbeitung zum Tragen kommen.

Frühere Untersuchungen zum Einfluss der Edge-Rate auf die wahrgenommene Geschwindigkeit wurden zumeist unter Verwendung sehr einfacher Muster (Linien, Punktwolken, Gitter) durchgeführt. Inwieweit sich die Edge-Rate in einer realistisch erscheinenden Szene bei gleichzeitiger Verfügbarkeit adäquater Texturinformationen (optischer Fluss) auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung auswirkt haben wir im folgenden Experiment untersucht.

6.9.2 Versuchsdurchführung

Das Experiment wurde in der dritten Generation der Simulationsanlage durchgeführt. Die Versuchspersonen nahmen auf einem Stuhl im Zentrum der Leinwand Platz. Die tatsächliche sowie die simulierte Augenhöhe der Versuchspersonen betrug 1.25m. Das simulierte Gesichtsfeld hatte eine Größe von $180 \times 50^\circ$, die Bildwiederholrate und die Videorate der Simulation betrug 72 Hz.

Den Versuchspersonen wurden in einem 2-IFC Paradigma nacheinander zwei Simulationen einer Fahrt entlang einer Straße präsentiert. Die Dauer einer jeden Präsentation betrug 2.0s. In der Pause (1.5s) zwischen beiden Präsentationen wurde ein hellblaues Hintergrundbild dargestellt. Nach der Präsentation der zweiten Fahrsimulation einer Paarung wurden die Versuchsperson durch eine Nachricht auf der Leinwand aufgefordert ihre Entscheidung, in welcher der beiden Fahrsimulationen die Fahrt mit höherer Geschwindigkeit dargestellt wurde, per Tastendruck zu treffen.

Der Standard-Reiz zeigte eine sechs Meter breite Straße, die auf beiden Seiten von Wiesenflächen flankiert wurde. Als Textur für die Straße haben wir ein Punktemuster mit einer Dichte der schwarzen Punkte von 20% verwendet (siehe Experiment 1, Abschnitt 6.6). Insgesamt haben wir zwei Standard-Reize mit unterschiedlichen simulierten Geschwindigkeiten verwendet ($5.55 \text{ m/s} = 20 \text{ km/h}$, $11.11 \text{ m/s} = 40 \text{ km/h}$). Den Einfluss der Dichte von Objekten und somit der Edge-Rate auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung haben wir für zwei Typen von Objekten untersucht. Zum einem handelte es sich um quer zur Fahrtrichtung verlaufende Linien auf der Straße (Abb. 19, links) und zum anderen um Straßenlaternen (Abb. 19, rechts). Pro Objekttyp haben wir den Einfluss der Objektinformation für zwei Objektdichten untersucht. Somit haben wir insgesamt also folgende Bedingungen getestet:

- Bedingung ST: Der Test-Reiz entsprach dem Standard-Reiz (Standard-Bedingung).
- Bedingung L1: In einem Abstand von 10m befanden sich quer zur Fahrtrichtung verlaufende gelbe Linien auf der Straße.
- Bedingung L2: wie Bedingung L1, die Linien hatten jedoch einen Abstand von nur 5m.
- Bedingung LM1: wie Bedingung L1, aber anstelle der Linien befanden sich zu beiden Seiten der Straße Laternen. Der Abstand zwischen den Laternen betrug 10m.
- Bedingung LM2: wie Bedingung LM1, die Laternen hatten jedoch einen Abstand von nur 5m voneinander.

Die Edge-Rate der Simulation berechnet sich als Quotient aus der Fahrgeschwindigkeit und dem Abstand der Objekte. Für die beiden Geschwindigkeiten des Standard-Reizes ergeben sich folgende Edge-Raten:

Bedingung L1, LM1: 0.55 Hz bei 5.55 m/s und 1.10 Hz bei 11.11 m/s

Bedingung L2, LM2: 1.10 Hz bei 5.55 m/s und 2.20 Hz bei 11.11 m/s

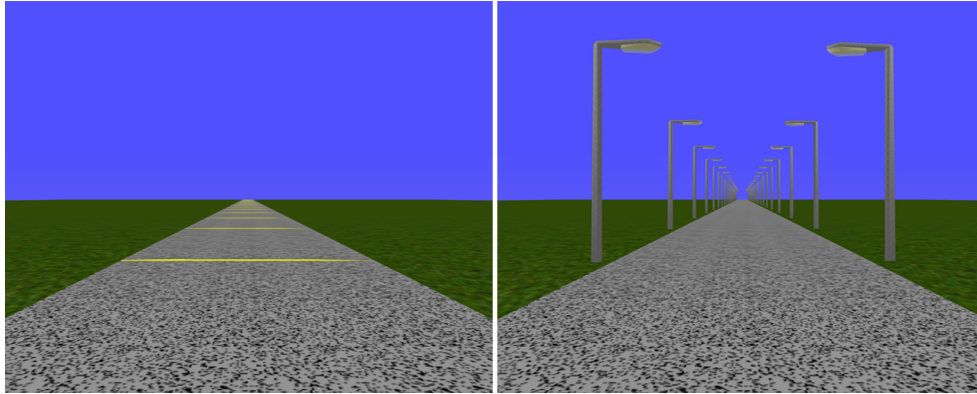


Abb. 19 Die Bilder zeigen digitale Schnappschüsse der Test-Reize der Bedingungen Nr. L1 und LM1.

Am Experiment nahmen sieben Versuchspersonen teil. Alle Versuchspersonen erhielten zunächst für die Dauer von ca. 10 Minuten die Möglichkeit der Eingewöhnung. Jede Versuchsperson führte dann im Verlauf mehrerer Sitzungen einen Block des Experiments durch, der aus insgesamt 10 Bedingungen (2 Geschwindigkeiten x 5 Objektbedingungen) bestand. Die Gesamtdauer des Experimentes betrug 2.5 Stunden. Das Kriterium zum Beenden einer Bedingung bestand im Erreichen von acht Umkehrungen des adaptiven Verfahrens.

6.9.3 Ergebnis

Auf den ersten Blick zeigen die Ergebnisse (Abb. 20) ein überraschendes Bild. Die Versuchspersonen nehmen die Fahrsimulation in den Bedingungen L1 und LM1 als signifikant (t-Test, $p < 0.05$) langsamer wahr als die Fahrsimulation in der Standard-Bedingung (ST).

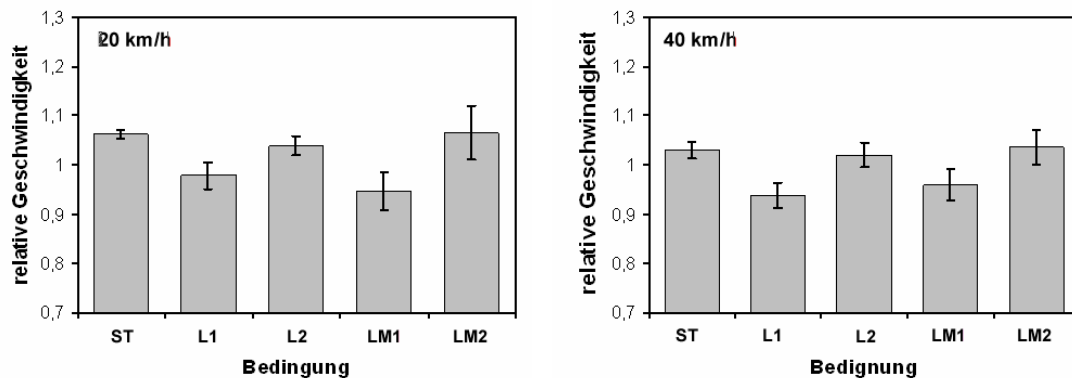


Abb. 20 Relative Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Objekttyp und der Dichte der Objekte. Jeder Balken stellt den Mittelwert aus sieben Versuchspersonen dar. Die Größe des Fehlerbalkens entspricht einem Standardfehler des Mittelwertes.

Durch das Hinzufügen der Linien und Laternen in den beiden Bedingungen kommt es also zu einer Reduktion der wahrgenommenen Geschwindigkeit. Eine Erhöhung der Dichte der Objekte in den Bedingungen L2 und LM2 führte im Vergleich zu den Bedingungen L1 und LM2 zu einer

signifikanten Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Eigenbewegung (t-Test, $p < 0.05$). Interessanterweise entspricht die wahrgenommene Geschwindigkeit in den Bedingungen L2 und LM2 genau dem Wert der Standard-Bedingung. Bei beiden getesteten Geschwindigkeiten des Standard-Reizes finden wir den gleichen Effekt von Objekttyp und Objektdichte auf die wahrgenommene Geschwindigkeit.

6.9.4 Diskussion

Obwohl wir im vorliegenden Experiment eine Straßenoberfläche (Textur) verwendet haben, die aufgrund der Information des optischen Flusses ein starkes Gefühl der Eigenbewegung hervorruft, finden wir trotzdem einen signifikanten Einfluss der Dichte von Objekten auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Allerdings wirkt sich das Einbringen der Objekte zunächst in unerwarteter Weise auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit aus. In den Bedingungen L1 und LM1 kommt es zu einer Reduktion der wahrgenommenen Geschwindigkeit.

Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung beider Objekttypen nehmen wir an, dass ihr Beitrag zur Information des optischen Flusses vernachlässigt werden kann. Dies würde wiederum bedeuten, dass die auf der Information des optischen Flusses basierende Geschwindigkeitsinformation zu einem bestimmten Grad von der Auswertung der Objektinformation überschrieben wird. Wichtig ist es festzuhalten, dass unsere Ergebnisse auf das Vorliegen zweier Strategien zur Auswertung der Geschwindigkeitsinformation hinweisen. Einerseits eine bild-basierte Strategie, bei der die Geschwindigkeit durch eine Auswertung des optischen Flusses bestimmt wird. Andererseits ein objekt-basiertes Verfahren, bei dem die Geschwindigkeit auf der Basis der Edge-Rate oder aber der Länge des zurückgelegten Weges bestimmt wird. Da in den Bedingungen L2 und LM2 eine Zunahme der Objektdichte und somit auch der Edge-Rate zu einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit führt (siehe auch Larish et al. 1990) erscheint uns eine Auswertung der zeitlichen Frequenz der Objekte wahrscheinlicher. In der natürlichen Umgebung tragen sicherlich beide Strategien zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung bei. Der relative Beitrag der einzelnen Strategien wird in der jeweiligen Situation freilich von den Eigenschaften der Szene abhängen.

Den Einfluss der Edge-Rate auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung hat man sich in England im Straßenverkehr zu Nutzen gemacht. In der Nähe von Kreuzungen befinden sich quer zur Fahrtrichtung verlaufende Streifen auf der Fahrbahn. Je näher ein Autofahrer der Kreuzung kommt, desto höher wird die Dichte der Streifen. Bei konstanter Fahrgeschwindigkeit erhöht sich somit aufgrund der zunehmenden Edge-Rate die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegungen und veranlasst den Autofahrer zu einem frühzeitigen Reduzieren seiner Fahrgeschwindigkeit (siehe Denton, 1980).

Interessant ist, dass sich beide Typen von Objekten, die wir in unserem Experiment verwendet haben, trotz unterschiedlicher Ausrichtung ihrer Hauptachsen in gleicher Weise auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit auswirken. Neben der Dichte ist aber auch die Position der Objekte im Gesichtsfeld von Bedeutung. Untersuchungen der Geschwindigkeitswahrnehmung in einem Fahrsimulator (Levine, 1995; Levine, Mourant, 1996) konnten zeigen, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung zunimmt, je näher sich Straßenpfosten an der Straße befinden.

Die bei der Untersuchung des Einflusses der Objektdichte und der Position der Objekte gefundenen Ergebnisse können direkt bei der Entwicklung virtueller Welten umgesetzt werden. Durch gezieltes Positionieren von kleineren und/oder größeren Objekten entlang der Straße kann der Entwickler einer Datenbasis entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung nehmen. Das Vorliegen dieser Möglichkeit ist vor allem im Hinblick auf die technischen Beschränkungen einer Simulationsanlage von Bedeutung. Während räumlich-zeitliche Bildeigenschaften wie Kontrast, zeitliche Frequenz und Ortsfrequenz besonders von technischen Beschränkungen betroffen sind, wirken sich technische Beschränkungen weit weniger negativ auf die Darstellung der für die Geschwindigkeitswahrnehmung relevanten Objekteigenschaften aus. Des Weiteren lässt sich das Positionieren von Objekten weit einfacher durchführen als das „Reverse-Engineering“ bei der Optimierung von Texturen.

Die Ergebnisse der Bedingungen L1 und LM2 haben gezeigt, dass der Entwickler einer Fahrsimulation bei der Dimensionierung der Dichte von Objekten einige Sorgfalt walten lassen muss, da es unter Umständen auch zu einer Reduktion der wahrgenommenen Geschwindigkeit kommen kann. Der beobachtete Rückgang der wahrgenommenen Geschwindigkeit bei Verwendung von Objekten scheint auf den ersten Blick im Widerspruch zu unserer Annahme einer Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung zu stehen. Allerdings sollte hier berücksichtigt werden, dass in der Standard-Bedingung eine Szene verwendet wurde, die Geschwindigkeitsinformationen ausschließlich über den optischen Fluss vermittelt. Die Szene enthält keine Objekte, die genaue Rückschlüsse auf die zurückgelegte Wegstrecke zulassen. Erst durch das Einfügen von Objekten, wobei dies besonders für die Straßenlaternen gilt, wird es dem Betrachter möglich von der Größe dieser Objekte auf die zurückgelegte Wegstrecke zu schließen.

6.10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung in einer Fahrsimulation hängt nicht nur von einem, sondern von mehreren visuellen Faktoren ab. Sowohl die Zunahme der Dichte von Objekten in einer Szene, ein vergrößertes horizontales Gesichtsfeld als auch eine Erhöhung des Kontrastes und des relativen Anteils hoher Frequenzen führt zu einer Zunahme der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Eigenbewegung. Unsere Ergebnisse weisen zudem auf eine Verarbeitung der

Geschwindigkeitsinformation in zwei unterschiedlichen Kanälen hin. In einem Kanal findet die Verarbeitung der Geschwindigkeitsinformation in sehr frühen Stufen der Informationsverarbeitung unter Berücksichtigung der Informationen der primären Bewegungsdetektoren statt. Im anderen Kanal erfolgt zunächst eine Segmentierung der Szene, eventuell kommt es hier sogar zu einer Erkennung der Objekte. Erst dann wird entweder durch Bestimmen der zeitlichen Frequenz der Objekte (Edge-Rate) oder durch Bestimmen des zurückgelegten Weges pro Zeiteinheit die Geschwindigkeit der Eigenbewegung bestimmt. Die Auswertung der Geschwindigkeitsinformation findet unter diesen Bedingungen in späteren (höheren) Verarbeitungsstufen statt.

Die Ergebnisse unseres letzten Experimentes geben Hinweise für ein teilweises Überschreiben der Informationen des ersten Kanals durch den zweiten Kanal, d.h. unter natürlichen Bedingungen scheint das objekt-basierte Geschwindigkeitssystem einen größeren Beitrag zur letztendlich wahrgenommenen Geschwindigkeit der Eigenbewegung zu leisten. Diese Aussage beinhaltet aber bereits, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit der Eigenbewegung letztendlich durch Integration der Informationen der beiden Kanäle erfolgt. Der relative Beitrag eines jeden Kanals hängt sicherlich von der genauen Zusammensetzung der Szene sowie von Eigenschaften der Umweltbedingungen (Tag, Nacht, Nebel) ab.

Für Entwickler virtueller Welten ist das gleichzeitige Vorliegen mehrerer visueller Faktoren, die einen signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung ausüben sehr vorteilhaft. Je nach Anforderung der Anwendung und den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln kann unter Umständen schon die Umsetzung eines einzigen Faktors genügen, um eine zufriedenstellende Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung zu erhalten. Der Entwickler einer Fahrsimulation muss im Einzelfall abwägen, inwieweit eine Verbesserung der Geschwindigkeitswahrnehmung durch einen bestimmten Faktor den zusätzlichen Aufwand bei der Implementierung des Faktors rechtfertigt. Unter Umständen kann auch ein Kompromiss zu einer guten Lösung führen, d.h. es werden alle drei Faktoren implementiert, jedoch keiner der Faktoren wird in seiner optimalen und damit aufwendigsten Form implementiert.

Die Größe des Gesichtsfeldes ist zwar verhältnismäßig einfach zu implementieren, führt aber zu einer starken Zunahme der Kosten, da nicht nur Projektoren und Leinwand, sondern im Regelfall auch die Rechenkapazität nachgerüstet werden müssen. Die Veränderung der Dichte und Position von Objekten unterliegt zumeist Beschränkungen durch die Rechenkapazität und Vorgaben hinsichtlich des Erscheinungsbildes der Szene. Sofern man plant, den Kontrast und die Ortsfrequenzen einer Szene durch eine gezielte Manipulation der Texturen zu optimieren, ist dies mit einem vermehrten Aufwand verbunden.

7 Geschwindigkeitskonstanz

7.1 Einleitung und Definition

Es ist für uns ein Leichtes, die objektive Geschwindigkeit (=km/h)²⁴ eines Fußgängers, der auf der gegenüberliegenden Straßenseite geht zu bestimmen (Epstein, 1978). Die Fähigkeit, die sich hinter dieser Leistung verbirgt wird in der Literatur als Geschwindigkeitskonstanz (Brown, 1931) bezeichnet. Allgemein formuliert handelt es sich bei der Geschwindigkeitskonstanz um die Fähigkeit des Menschen die objektive Geschwindigkeit von Gegenständen, die sich in unterschiedlicher Entfernung vom Betrachter bewegen, einschätzen zu können.

Bei der Geschwindigkeitskonstanz handelt es sich um einen Aspekt räumlicher Wahrnehmung, der in der Regel integraler Bestandteil übergeordneter Verhaltensleistungen wie beispielsweise der Navigation und Orientierung ist. Die Bedeutung der Geschwindigkeitskonstanz lässt sich am Besten an einem Beispiel aus dem täglichen Leben darstellen. Nehmen wir an, Sie fahren mit ihrem Auto auf einer Hauptstrasse. Damit Sie ein ökonomisches Fahrverhalten an den Tag legen können, müssen Sie ihre Handlungen auf einige Zeit im Voraus planen. Entscheidungen wie, auf welcher Spur Sie am schnellsten vorankommen bzw. mit welcher Geschwindigkeit Sie sich einer Kreuzung nähern erfordern die Kenntnis der objektiven Geschwindigkeit, aber auch der Bewegungsrichtung anderer Verkehrsteilnehmer.²⁵

Alle derzeit existierenden Modelle zur Beschreibung der visuellen Informationsverarbeitung bei Bewegungsvorgängen können zwar die Wahrnehmung der Winkelgeschwindigkeit erklären (Smith, Edgar, 1984, Adelson, Bergen, 1985, van Santen, Sperling, 1985, Watson, Ahumada, 1985), sie bieten aber keine vollständige Begründung der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit. Während der Wert der Winkelgeschwindigkeit von der Entfernung abhängt - je weiter ein Gegenstand vom Beobachter entfernt ist, desto langsamer bewegt sich sein Abbild auf der Netzhaut des Auges - ist die objektive Geschwindigkeit eines Gegenstandes unabhängig von seiner Entfernung. Folglich stellt sich an dieser Stelle die Frage *„Wie und mit Hilfe welcher Zusatzinformationen rekonstruiert das visuelle System die objektive Geschwindigkeit eines Gegenstandes?“*

²⁴ Die objektive Geschwindigkeit eines Gegenstandes wird in m/s bzw. km/h gemessen. Somit ist die objektive Geschwindigkeit im Gegensatz zur Winkelgeschwindigkeit (°/s) unabhängig von der Position und Blickrichtung des Betrachters.

²⁵ Sicherlich kann man hier spekulieren, ob nicht auch „Time-to-Contact“ - Mechanismen eine zufriedenstellende Lösung für diese Aufgabe bieten. Da diese Mechanismen jedoch auf einer Auswertung der Information des optischen Flusses basieren, erscheinen sie im Hinblick auf die Aufgabenstellung als zu aufwendig.

7.2 Überblick

Im folgenden werden wir zunächst die wichtigsten Ergebnisse früherer Untersuchungen sowie die zur Erklärung der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit vorgeschlagenen Modelle einführen. Alle früheren Untersuchungen zur Geschwindigkeitskonstanz haben ausnahmslos einfache Reizmuster verwendet. Da wir von einem entscheidenden Einfluss des Vorwissens des Menschen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ausgehen, werden wir hingegen in unseren Experimenten realistisch erscheinende Szenen verwenden (Abb. 21). Dass die Verwendung von Vorwissen im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitskonstanz von Bedeutung ist, zeigt eine erst kürzlich veröffentlichte Beobachtung von Hershenson & Samuels (1999). Die Autoren berichten von einem Angestellten einer Kaserne, der ein Flugobjekt beobachtete, das sich mit unglaublicher hoher Geschwindigkeit zu bewegen schien. Als der Angestellte bemerkte, dass es sich bei dem Flugobjekt nicht um ein „großes“ Flugzeug, sondern eine „kleine“ Drohne handelte, führte dies augenblicklich zu einem Rückgang der wahrgenommenen Geschwindigkeit. Die Beobachtung bestätigt nicht nur die Verwendung von Vorwissen, sondern deutet auch auf den entscheidenden Einfluss der Größe von bekannten Objekten auf die Wahrnehmung ihrer objektiven Geschwindigkeit hin. Die Untersuchung des Einflusses der Größe wird einen Schwerpunkt unserer Arbeit darstellen. Daneben werden wir aber auch den Einfluss einer Reihe weiterer sogenannter Entfernungshinweise auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit untersuchen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass es sich bei der Geschwindigkeitskonstanz um eine sehr robuste Wahrnehmungsleistung handelt. Selbst in Situationen, in welchen nur die bewegten Objekte sichtbar sind, können wir annähernd den gleichen Grad an Geschwindigkeitskonstanz beobachten wie bei einer Darstellung der gleichen Objekte in einer realistisch erscheinenden Landschaft. Nur Änderungen der Objektgröße führen zu einem entscheidenden Rückgang der beobachteten Geschwindigkeitskonstanz. Insgesamt zeigen unsere Ergebnisse, dass unter realistischen Bedingungen der Verwendung von Vorwissen über die Größe der Objekte eine entscheidende Bedeutung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit zukommt. Frühere Modelle zur Erklärung der Geschwindigkeitskonstanz tragen vor allem Sachverhalt der Verwendung von Vorwissen keine Rechnung und sind deshalb nur bedingt geeignet um Geschwindigkeitskonstanz unter realistischen Bedingungen zu erklären.

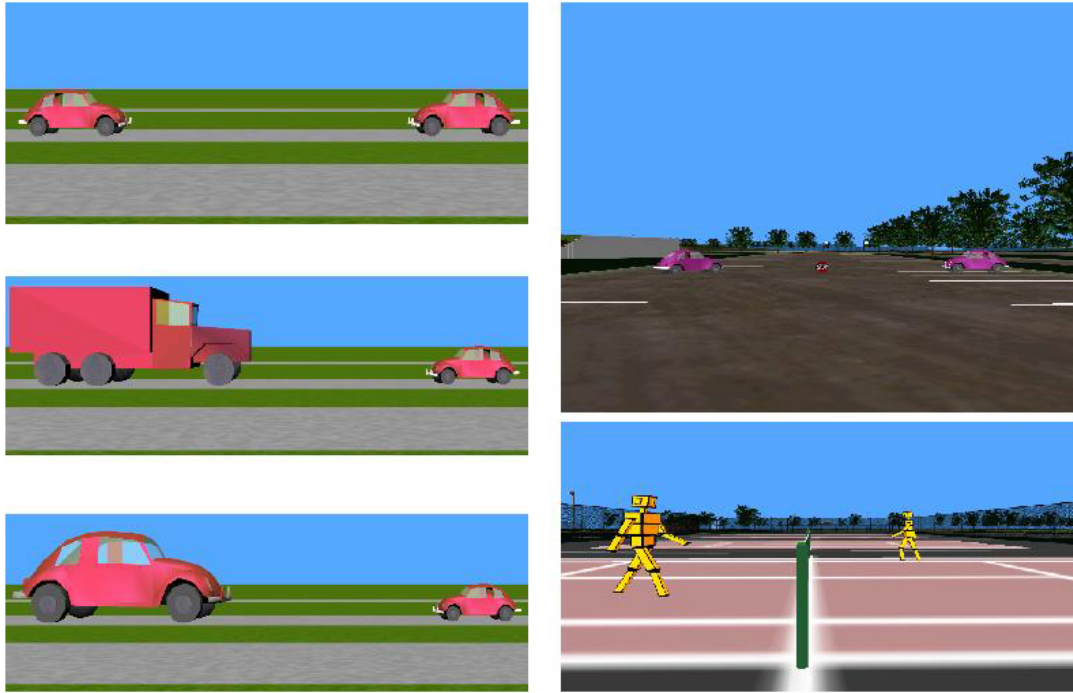


Abb. 21 Die Kollage zeigt eine Reihe von Szenen, die wir in unseren Versuchen zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz verwendet haben. Es wird besonders darauf hingewiesen, dass die verwendeten Szenarien ein wesentlich realistischeres Erscheinungsbild haben als die Reizmuster früherer Untersuchungen.

7.3 Geschichte der Geschwindigkeitskonstanz

7.3.1 Einleitung

Nur eine vergleichsweise geringe Zahl von Arbeiten (≈ 10) hat sich im Lauf der Jahre mit dem Thema der Geschwindigkeitskonstanz beschäftigt. Verwandte Themenbereiche wie die Bewegungs- (Nakayama, 1985), Geschwindigkeits- (McKee, Silvermann, Nakayama, 1986; Chen, Bedell, Frishmann, 1998), Größen- (Boring, 1946; Gregory, 1963; Epstein, 1973; McKee, Welch, 1992) und Entfernungswahrnehmung (Epstein, 1973; Glennerster, Rogers, Bradshaw, 1998; Brenner, van Damme, 1999) sind dagegen gut untersucht. Über die Ursachen hierfür können wir nur spekulieren. Mit hoher Wahrscheinlichkeit tragen alle zuvor erwähnten Wahrnehmungsleistungen in der einen oder anderen Weise zur Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit bei. Derartige integrierte Wahrnehmungsleistungen sind im allgemeinen weniger gut untersucht. Des weiteren vermuten wir, dass Schwierigkeiten bei der Planung und Realisierung des experimentellen Aufbaus für die vergleichsweise geringe Zahl experimenteller Studien verantwortlich sind. Vor allem bei der Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz bei größeren Entfernungen der Objekte (5-100m) bringt die gezielte und definierte Veränderung von Entfernung, Größe und Geschwindigkeit des Objektes einem hohen Aufwand mit sich, sofern nicht Computer-Graphik verwendet wird.

7.3.2 Brown (1928, 1931) und Wallach (1939)

Erstmals beobachtet, untersucht und beschrieben wurde Geschwindigkeitskonstanz von Brown (1931), der sich in seinen Experimenten allerdings weniger auf die Klärung der Frage nach dem Mechanismus der Geschwindigkeitskonstanz konzentriert hat, sondern vielmehr den Einfluss unterschiedlicher Faktoren, wie Helligkeit, Kontrast, Textur des Hintergrundes, Größe des Objektes und Größe der Apertur (Referenzrahmen) auf die wahrgenommene Geschwindigkeit untersuchte.

In Browns erstem Experiment wurden den Versuchspersonen gleichzeitig zwei sich bewegende Punkte *a* und *b* in unterschiedlichen Entfernungen präsentiert. Punkt *a* wurde in Entfernungen von 10.0, 6.6 oder 3.3m, Punkt *b* immer in einer Entfernung von 1.0m dargestellt. Die Geschwindigkeit von Punkt *a* war konstant 10 cm/s. Aufgabe der Versuchspersonen war es die Geschwindigkeit von Punkt *b* so einzustellen, dass Punkt *a* und *b* als sich gleich schnell bewegend wahrgenommen werden.

Die Ergebnisse von Browns Experiment zeigen eindeutig, dass die Versuchspersonen unter diesen Bedingungen die objektive und nicht die Winkelgeschwindigkeit der Punkte vergleichen. Tatsächlich überschätzen die Versuchspersonen die Geschwindigkeit des näheren Punktes *b* um so mehr je weiter Punkt *a* entfernt ist.

Brown hat ferner herausgefunden, dass sich ein Punkt doppelter Größe in einem Referenzrahmen (Apertur) doppelter Größe (Abb. 22, rechts) bei gleicher Entfernung doppelt so schnell (objektiv) bewegen muss wie ein Punkt „einfacher Ausdehnung“ (Abb. 22, links) in einem Referenzrahmen einfacher Größe, damit beide Punkte als sich gleich schnell bewegend wahrgenommen werden. Brown bezeichnete diesen Effekt als „Velocity Transposition Effect“. Kennzeichnend für die Transposition ist, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit von Objekten gleich ist, wenn das Verhältnis Winkelgeschwindigkeit zu dem Winkel, den der Referenzrahmen des Reizes im Gesichtsfeld aufspannt, gleich ist.

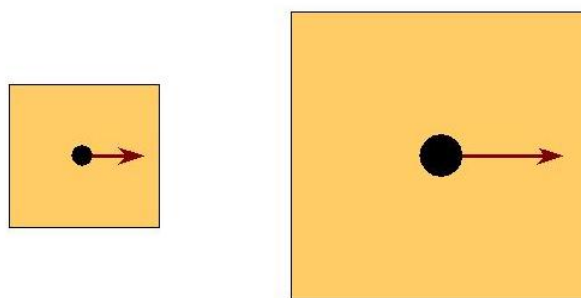


Abb. 22 Schematische Darstellung zur Erklärung des „Velocity Transposition-Effect“ (siehe Text).

Allerdings hat Brown selbst noch keinen direkten Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitskonstanz und dem Transpositions-Effekt gesehen. Dieser Zusammenhang wurde erst einige Jahre später von Wallach (1939) hergestellt. Wallachs Argumentation basiert auf dem bereits angesprochenen Verhältnis zwischen der Winkelgeschwindigkeit des Reizes und der Größe des

Winkels des Referenzrahmens. Wenn die Entfernung eines Reizes verdoppelt wird, dann wird sowohl seine Winkelgeschwindigkeit als auch der Winkel des Referenzrahmens halbiert. Das Verhältnis von Winkelgeschwindigkeit zu Winkel des Referenzrahmens bleibt jedoch konstant, d.h. ein Referenz-Reiz in einfacher Entfernung und ein Stimulus in doppelter Entfernung werden bei gleicher objektiver Geschwindigkeit der bewegten Reize als sich gleich schnell bewegend wahrgenommen. Entscheidend an Wallachs Theorie ist, dass die wahrgenommene Entfernung des Objektes bei der Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit keine Rolle spielt. Die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit wird unter diesen Bedingungen durch das Verhältnis Winkelgeschwindigkeit zu Größe des Referenzrahmens bestimmt. Im weiteren Verlauf werden wir uns mit dem Begriff Relations-Hypothese auf Wallachs Argumentation beziehen.

7.3.3 Smith und Sherlock (1958)

Einige Jahre später konnten Smith and Sherlock zeigen, dass es unter den experimentellen Bedingungen Browns wahrscheinlich war, dass Versuchspersonen nicht die eigentliche Geschwindigkeit des Reizes abschätzten, sondern an Stelle dessen die Frequenz verglichen haben mit der die Punkte den Referenzrahmen passierten. Dies bedeutet, dass die Versuchspersonen Browns die zeitliche Frequenz der beiden Reize verglichen haben. Im weitesten Sinne handelt es sich bei der Bestimmung der zeitlichen Frequenz um eine andere Interpretation von Wallachs Relations-Hypothese. Bei der Bildung dieses Verhältnisses von Winkelgeschwindigkeit des Reizes zu Winkelgröße des Rahmens wird letztendlich die zeitliche Frequenz des bewegten Reizes bestimmt.

7.3.4 Rock, Hill, Fineman (1968)

Ein alternativer Mechanismus zur Erklärung der Geschwindigkeitskonstanz wurde 1968 von Rock et al. vorgeschlagen. Bei Rock stellt die Geschwindigkeitskonstanz ein Derivat der Größenkonstanz dar. Der Beobachter schätzt die Länge der Wegstrecke, die ein Gegenstand in einem bestimmten Zeitraum zurückgelegt hat und schließt hieraus auf die Geschwindigkeit des Gegenstandes. Die Wahrnehmung des zurückgelegten Weges setzt allerdings die Kenntnis der Entfernung des bewegten Gegenstandes voraus, denn Rocks Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Anwesenheit rudimentärer Entfernungshinweise notwendig ist, damit die Versuchspersonen die objektiven und nicht die Winkelgeschwindigkeiten der bewegten Reize vergleichen. Im Gegensatz zu Wallachs Hypothese (1939) lassen Rocks Ergebnisse folglich auf eine Verwendung der wahrgenommenen Entfernung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit schließen.

7.3.5 Wist, Diener, Dichgans (1976)

Ähnlich wie Rock et al. (1968) haben auch Wist et al. (1976) gefunden, dass die wahrgenommene Entfernung eines Gegenstandes eine entscheidende Rolle bei der Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit spielt. Laut Wist et al. fließt die wahrgenommene Entfernung nach folgender Gleichung in die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ein:

$$M' = k * \omega * D'$$

M' ist die wahrgenommene Geschwindigkeit des Gegenstandes, D' die wahrgenommene Entfernung, ω die Winkelgeschwindigkeit und k ein Proportionalitätsfaktor.

7.3.6 Epstein (1978)

Epsteins Experimente bestätigen zunächst im wesentlichen die Hypothese Wallachs. Das Verhältnis Winkelgeschwindigkeit zu Winkelgröße des Rahmens eignet sich laut Epstein vor allem beim Vergleich objektiver Geschwindigkeiten. Allerdings kann Wallachs Relations-Hypothese Geschwindigkeitskonstanz nicht unter allen Bedingungen erklären. Bewegt sich beispielsweise ein heller Punkt in einem ansonsten dunklen Raum, so fehlt dem Beobachter der Referenzrahmen. Trotzdem ist der Beobachter in der Lage die objektive Geschwindigkeit des Punktes einzuschätzen. Epstein schlägt zwei Strategien vor, mittels welcher das visuelle System unter diesen Bedingungen Geschwindigkeitskonstanz erreicht.

1. „*Extent mediation*“ (Epstein, 1978, S. 113): Der Beobachter erschließt die objektive Geschwindigkeit durch den Quotienten aus dem zurückgelegten Weg und der Zeitdauer (siehe Rock et al., 1968). Zum Bestimmen des zurückgelegten Weges eines bewegten Gegenstandes benötigt der Beobachter die Kenntnis der Entfernung des bewegten Gegenstandes.
2. „*Distance calibration*“ (Epstein, 1978, S. 113): Der Beobachter verwendet die wahrgenommene Entfernung des Gegenstandes, um die wahrgenommene Winkelgeschwindigkeit zu kalibrieren.

7.3.7 McKee, Welch (1989), Zohary, Sittig (1993) und McKee, Smallman (1997)

Gegen eine Verwendung der Entfernung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit sprechen jedoch die Ergebnisse neuerer Arbeiten von McKee et al. (1989) und von Zohary et al. (1993). Basierend auf der Aussage Epsteins (1978), dass Entfernung und Winkelgeschwindigkeit zur Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit kombiniert werden treffen McKee et al. eine Vorhersage für den Wert des Weber-Quotienten, der unter diesen Bedingungen beim Vergleich objektiver Geschwindigkeiten zu erwarten wäre. Der von McKee et al. gefundene Wert des Weber-Quotienten ist aber wesentlich größer als der vorhergesagte Wert. Hieraus schließen McKee et al., dass die wahrgenommene Entfernung (hier: Disparität) keine Rolle bei der Wahrnehmung der

objektiven Geschwindigkeit spielt. Dieses Ergebnis wird auch durch die Untersuchungen von Zohary et al. bestätigt. Unter Verwendung von Random-Dot- und Julesz-Mustern fanden die Autoren zwar eine starke Abhängigkeit der objektiven Geschwindigkeit von der relativen Größe der Stimuli, die Ergebnisse der Geschwindigkeitsexperimente waren jedoch wie bei McKee et al. unabhängig von Entfernungsschätzungen.

Neueren Überlegungen von McKee und Smallman (1997) zufolge nimmt der Beobachter die objektive Geschwindigkeit von Gegenständen entweder auf der Basis einer skalierten Weglänge oder durch Bestimmen der zeitlichen Frequenz wahr. Skalierte Weglänge bedeutet, dass die vom Gegenstand zurück gelegte Weglänge in Relation zu einer Referenzgröße gesetzt wird. In der natürlichen Umgebung können entweder andere Objekte in der Szene oder das Objekt selbst als Referenzgröße dienen. In gewisser Weise ähnelt die vorliegende Theorie sehr stark der Theorie von Rock. Allerdings kommen McKee und Smallman ohne Wissen über die Betrachter-Gegenstand Entfernung aus, während eine Schlussfolgerung Rocks darin bestand, dass zumindest rudimentäre Entfernungshinweise vorliegen müssen.

Während die Winkelgeschwindigkeit auf einer direkten Auswertung der Information der primären Bewegungsdetektoren beruht (Grywacz, Yuille, 1990; Heeger, 1987), müssen zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit mehrere Informationen kombiniert werden. Da eine größere Anzahl von Faktoren zu einem größeren Unsicherheitsfaktor führt, erklärt dies wiederum den größeren Wert des Weber-Quotienten, den McKee et al. (1989) beim Vergleich objektiver Geschwindigkeit gefunden haben.

7.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse früherer Arbeiten

Aus den Ergebnissen der früheren Experimente ergeben sich insgesamt drei mögliche Strategien (Abb. 23) des visuellen Systems zur Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit von bewegten Körpern. Die erste Strategie (Abb. 23, Strategie 1a) basiert auf einer Skalierung der retinalen Geschwindigkeit durch die wahrgenommene Entfernung, womit dem korrekten Einschätzen der Entfernung eine entscheidende Bedeutung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit zukommt (Epstein, 1978). Auch bei der zweiten Strategie (Abb. 23, Strategie 1b) spielt die Wahrnehmung der Entfernung eine Rolle. Hier ist die Geschwindigkeitskonstanz im weitesten Sinne ein Derivat der Größenkonstanz. Der Betrachter erschließt die objektive Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes, indem er den Weg bestimmt, den der Gegenstand in einem bestimmten Zeitraum zurücklegt (Rock et al., 1968). Gemeinsam ist beiden Strategien das Verwenden der Information über die wahrgenommene Entfernung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit (Rock et al., 1968; Wist et al., 1976; Epstein, 1978).

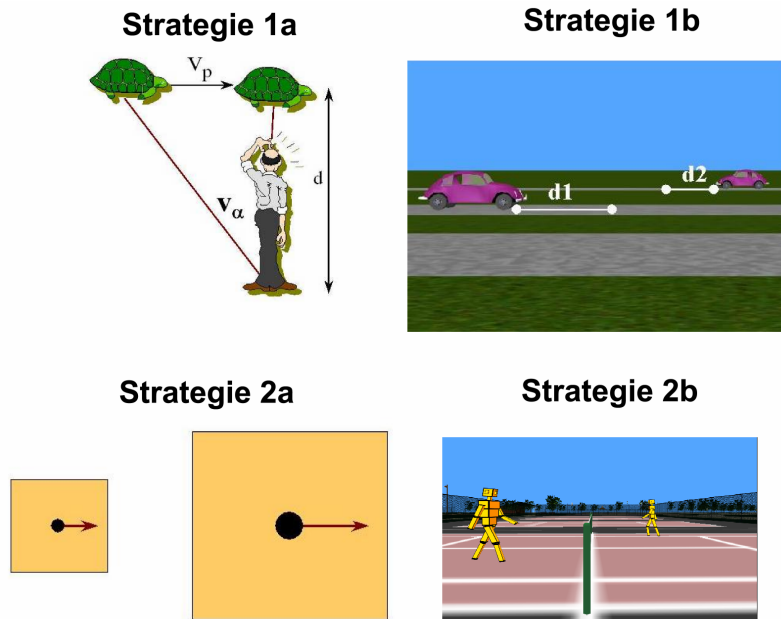


Abb. 23 Mögliche Strategien zur Lösung des Geschwindigkeitskonstanz-Problems (siehe Text)

Dahingegen deuten die Experimente von McKee et al. (1989) und Zohary et al. (1993) darauf hin, dass Information über die wahrgenommene Entfernung keine Bedeutung für die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit hat. Diese Autoren favorisieren eine dritte Strategie (Abb. 23, Strategie 2a), die im wesentlichen auf der Auswertung der zeitlichen Frequenz beruht. Wie Smith et al. (1958) gezeigt haben, konnten die Versuchspersonen Browns (1931) die Geschwindigkeit der beiden bewegten Punkte vergleichen, indem sie die Frequenz mit welcher die Punkte die Apertur passiert haben, bestimmten. Auch Wallachs Relations-Hypothese gehört zu dieser Gruppe. Allerdings ist das Vorliegen eines eindeutigen Referenzrahmens in erster Linie ein Produkt des Versuchsaufbaus. Bei genauerer Betrachtung findet man jedoch auch im Alltag Referenzrahmen in Form einzelner statischer Objekte bzw. von Objektgruppierungen (Strategie 2b, Abb. 23). Genauso gut kann aber auch das bewegte Objekt seinen eigenen Referenzrahmen darstellen (McKee et al., 1997). Der Betrachter bestimmt in diesem Fall, um wie viele Vielfache seiner eigenen Länge sich ein Objekt in einem bestimmten Zeitraum fortbewegt hat. An dieser Stelle ist es wichtig zu erkennen, dass auch Wallachs Relations-Hypothese nicht ganz ohne Kenntnis von Entfernungen auskommt. Zwar benötigt der Betrachter keine Kenntnis der Betrachter-Gegenstand Entfernung, jedoch muss sichergestellt sein, dass sich der Rahmen und der bewegte Gegenstand in der gleichen Entfernung befinden.

7.4 Geschwindigkeitskonstanz in Alltagssituationen

Fast alle früheren Experimente liefern sehr klare Aussagen hinsichtlich der Verwendung der wahrgenommenen Entfernung zum Erreichen der Geschwindigkeitskonstanz. Die Eindeutigkeit der Aussagen ist unserer Meinung nach ein Produkt der experimentellen Paradigmen und der verwendeten

Reizmuster. Alle Versuchsapparaturen bieten einen Referenzrahmen im zentralen Gesichtsfeld. Da der Beobachter mit den bewegten Objekten (Linien, Punkte) nicht aus dem täglichen Leben vertraut ist, stellt deren relative Bewegung bezüglich des Rahmens sicherlich eine plausible Strategie zur Bewältigung der Aufgabe dar. Im Gegensatz dazu besitzen wir unter natürlichen Bedingungen Vorwissen über die Eigenschaften von bekannten Gegenständen (z.B. Autos, Fußgänger). So erleichtert beispielsweise die Vorkenntnis der objektiven Größe²⁶ eines Autos das Bestimmen seiner Entfernung. Unter diesen Bedingungen genügt bereits das Vorliegen von Information über die Winkelgröße des Objektes im Gesichtsfeld, um seine Entfernung bestimmen zu können. Auch im Hinblick auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit erwarten wir einen signifikanten Einfluss des Vorwissens. Bestätigt wird unsere Vermutung durch folgende Beobachtung, die den Einfluss der bekannten Größe eines Flugobjektes auf die Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit beschreibt.

7.4.1 Flugzeug-Illusion von Hershenson & Samuels (1999)

„I was in my department head's corner office looking out of the windows. The US Air Force Academy is at an altitude of over 7000 feet, and this office was the top floor of one of the highest buildings on the base. The surrounding area is between 6000 and 7000 feet and the view went out 15 miles and more for almost 270° of the visual field. A fast-moving airplane caught my eye. Fast-moving jets often fly over the Academy, so this was something I was quite familiar with. They are often used to inspire cadets over the base, or out on exercises from the nearby Peterson Air Force Base. This plane, however, was moving at an incredible rate, perhaps over Mach 2. I was wondering if this was the new F-22, or perhaps an experimental aircraft, when I watched the plane take a sickeningly impossible turn – a turn so tight it should have killed the pilot and ripped the wings off the aircraft. Yet, there it was, still moving incredibly fast and, again making impossible turns, climbs and dives. Then I looked down and noticed that this not a jet approximately 2 miles out, but a remote-controlled drone plane being flown from a field about 300 yards away. Once I realized this, my mind was able to adapt and see the much slower speeds and therefore gentler turns. Interestingly enough, I also found it easy to drift back into the illusory state and again watch the full-sized plane move at breakneck speeds and complete impossible acrobatics.“ (aus Hershenson & Samuels, 1999)

7.4.1.1 Interpretation Nr. 1: Fehleinschätzung der Entfernung

Der Beobachter bei Hershenson et al. nimmt an, dass es sich bei einem Flugobjekt um ein Flugzeug und nicht um eine Drohne (kleines Flugmodell) handelt. Aufgrund seines Vorwissens über die Größe eines Flugzeuges überschätzt er die Entfernung des Flugzeuges. In Verbindung mit der wahrgenommenen Winkelgeschwindigkeit ergibt dies die „unglaublich“ hohe objektive Geschwindigkeit des Flugobjektes. Als der Betrachter seinen Fehler (Drohne statt Flugzeug) erkennt, korrigiert sich auch die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit.

²⁶ Der Begriff „objektive Größe“ beschreibt die Größe (Ausdehnung) eines Objektes in Metern.

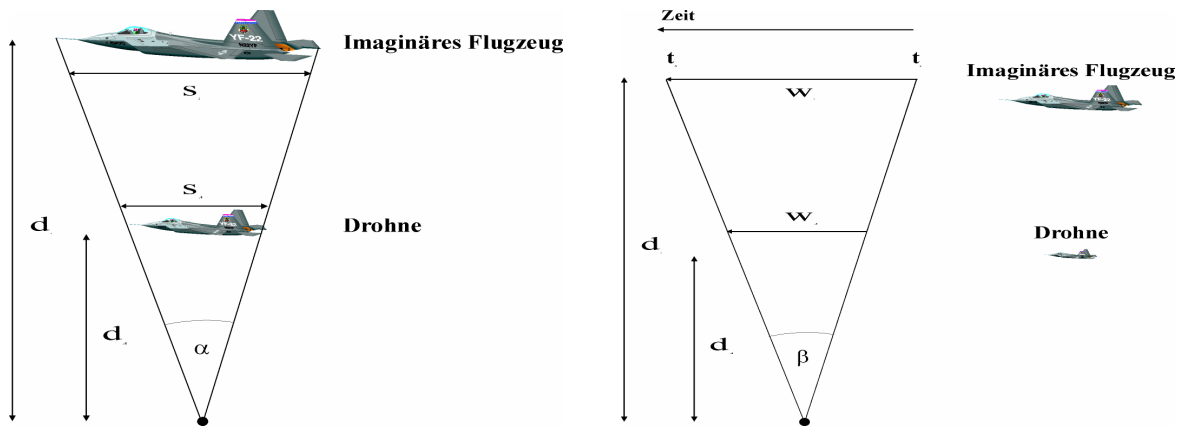


Abb. 24 Die „Flugzeug-Illusion“. Links ist der Zusammenhang zwischen „vorgestellter“ objektiver Größe und der hieraus resultierenden tatsächlichen Entfernung des Objektes gezeigt. Im rechten Teil der Abbildung ist dargestellt wie sich die vorgestellte Größe des Flugobjektes auf die wahrgenommene Geschwindigkeit auswirkt (weitere Einzelheiten finden sich im Text).

Der Beobachter bei Hershenson sieht ein Flugobjekt, das im Gesichtsfeld eine Winkelgröße α einnimmt (Abb. 24). Bei diesem Flugobjekt handelt es sich in Wirklichkeit um eine Drohne – ein kleines Flugmodell – während der Beobachter irrtümlich von einem Flugzeug ausgeht. Die Winkelgröße α des Flugobjektes ist unabhängig von dieser Fehleinschätzung, nicht aber die Wahrnehmung seiner Entfernung, da diese direkt von der Annahme des Betrachters über die objektive Größe des Flugobjektes bestimmt wird (Abb. 24, links). Allgemein ergibt sich die wahrgenommene Entfernung unter diesen Bedingungen zu:

$$d = \frac{s}{\tan(\alpha)}$$

wobei s die (angenommene) objektive Größe, d die Entfernung des Flugobjektes in Metern ist. Für die wahrgenommene Entfernung der Drohne d_d ergibt sich somit:

$$d_d = \frac{s_d}{\tan(\alpha)}$$

s_d ist die objektive Größe der Drohne, die sich aus dem Vorwissen des Beobachters ergibt. Für die wahrgenommene Entfernung d_i des „vermuteten“ Flugzeuges gilt analog:

$$d_i = \frac{s_i}{\tan(\alpha)}$$

Dabei ist s_i die objektive Größe des Flugzeuges. Aufgrund seiner Fehleinschätzung geht der Beobachter von einer objektiven Größe s_i und nicht s_d aus. Da $s_i \gg s_d$ ist, wird auch $d_i \gg d_d$ sein, d.h. der Benutzer vermutet das Objekt in einer größeren Entfernung als dies wirklich der Fall ist.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit (Abb. 24,

rechts). Das Flugobjekt legt im Zeitraum Δt , wobei $\Delta t = t_2 - t_1$, eine Strecke zurück, die dem Winkel θ entspricht. In der vorliegenden Situation ist die Größe des Winkels unabhängig von der angenommenen Entfernung des Objektes. Die Winkelgeschwindigkeit ω des Flugobjektes berechnet sich zu

$$\omega = \frac{\theta}{\Delta t}$$

Da die Winkelgeschwindigkeit ω direkt wahrgenommen werden kann ist der Wert von ω unabhängig von der angenommenen Entfernung des Flugobjektes. Im Gegensatz hierzu hängt die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit v des Flugobjektes von der Einschätzung seiner Entfernung ab.

$$v = \frac{d * \tan(\theta)}{\Delta t}$$

Damit beträgt die objektive Geschwindigkeit v_d der Drohne

$$v_d = \frac{d_d * \tan(\theta)}{\Delta t}$$

und die Geschwindigkeit v_i des Flugzeuges

$$v_i = \frac{d_i * \tan(\theta)}{\Delta t}$$

Durch Einsetzen der obigen Gleichung ergibt sich folgende Beziehung für das Verhältnis der Geschwindigkeiten

$$\frac{v_i}{v_d} = \frac{d_i}{d_d} = \frac{s_i}{s_d}$$

Damit zeigt sich, dass sich das Verhältnis der objektiven Geschwindigkeiten des imaginären und des tatsächlichen Flugobjektes direkt aus den entsprechenden Verhältnissen der angenommenen Entfernung bzw. der Größen ableiten lässt. Da die tatsächliche Größe des Flugobjektes s_d fest vorgegeben ist, bestimmt letztendlich die Annahme und somit das Vorwissen über die objektive Größe des Flugobjektes die Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit.

7.4.1.2 Interpretation Nr. 2: Fehleinschätzung durch den direkten Einfluss der objektiven Größe des Flugzeuges

Bei der Diskussion möglicher Strategien (siehe Abschnitt 7.3.8) zum Erreichen der Geschwindigkeitskonstanz haben wir gezeigt, dass Wallachs Interpretation von Browns Ergebnissen letztendlich auf einer Auswertung der zeitlichen Frequenz durch den Beobachter beruht. Dabei stellt

das Objekt selbst den Rahmen dar, relativ zu dem es sich bewegt. Wie wir im folgenden zeigen werden, lassen sich die Beobachtungen der Flugzeug-Illusion nicht nur durch eine Fehleinschätzung der Entfernung, sondern auch durch die gleichzeitige Auswertung der zeitlichen Frequenz und der objektiven Größe eines Gegenstandes erklären. Bei Verwendung der Auswertung der zeitlichen Frequenz bestimmt der Beobachter die objektive Geschwindigkeit des Flugzeuges, indem er feststellt, um wie viele Vielfache seiner eigenen Größe sich das Flugzeug in einem bestimmten Zeitraum bewegt hat (siehe auch Abschnitt 7.3.8). Eine Fehleinschätzung der objektiven Größe des Flugzeuges führt somit nicht zu einer Fehleinschätzung der zeitlichen Frequenz, aber bei der Umsetzung der zeitlichen Frequenz in die objektive Geschwindigkeit kommt es durch das Überschätzen der objektiven Größe des Flugzeuges zu einem Überschätzen der zurück gelegten Wegstrecke und damit auch der objektiven Geschwindigkeit des Flugzeuges.

7.4.2 Landeanflug von Flugzeugen

Die Bedeutung der objektiven Größe eines Gegenstandes für die Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit wird auch durch die im folgende geschilderte Beobachtung untermauert. Bei der Fahrt entlang einer Flughafenautobahn sieht man von unten auf Flugzeuge im Landeanflug, wobei unter diesen Bedingungen dann zumeist keine zusätzlichen Gegenstände im Blickfeld sichtbar sind. Obwohl das Flugzeug zu diesem Zeitpunkt noch eine vergleichsweise hohe Geschwindigkeit hat, erscheint uns die Bewegung sehr langsam. Unter Berücksichtigung der Überlegungen des vorangehenden Abschnittes bedeutet dies, wir unterschätzen die objektive Größe des Flugzeuges. Für den Laien heben sich Personen-Flugzeuge kaum in ihrem Aussehen voneinander ab, obwohl sie zum Teil erheblich unterschiedliche Größen haben. Da die wenigsten von uns die Möglichkeit haben, Flugzeuge regelmäßig aus der Nähe betrachten zu können, kommt eine Fehleinschätzung – hier ein Unterschätzen – der Größe von Flugzeugen nicht unerwartet.

Beobachten wir die gleiche Situation, den Landeanflug eines Flugzeuges aus einem Flughafengebäude so scheint sich das Flugzeug im Landeanflug schneller als zuvor zu bewegen. Der Unterschied zwischen dieser Situation und dem Beobachten auf der Autobahn ist, dass neben dem Flugzeug auch andere Gegenstände bekannter Größe im Gesichtsfeld sichtbar sind. Da uns die meisten dieser Gegenstände (Fahrzeuge, Gebäude, Bäume) weit mehr vertraut sind als Flugzeuge wird die wahrgenommene objektive Größe des Flugzeuges vermutlich durch die objektiven Größen der anderen Gegenstände korrigiert.

7.5 Allgemeine Einführung der Experimente

Der Schwerpunkt unserer Experimente wird auf der Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz unter realistischeren Bedingungen liegen. Unser vorrangiges Ziel ist es, herauszufinden, welche

Faktoren unter ökologisch relevanten Bedingungen von entscheidender Bedeutung für die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit sind. In der natürlichen Umgebung stehen dem Beobachter mehrere Informationsquellen zur Verfügung, die ihm unter den eingeschränkten Bedingungen der früheren Experimente vorenthalten wurden. Entscheidend ist, dass der Betrachter unter realistischen Bedingungen ähnlich wie bei der Größenkonstanz (Kaufman, 1982) Vorwissen (Top-Down-Informationsverarbeitung) über seine Umwelt bei der Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit einsetzen kann. Wir schließen jedoch das Auftreten eines „Top-Down-Effekt“ in früheren Experimenten nicht komplett aus, da bewegte Punkte in der Vorstellung der Versuchspersonen durchaus mit bekannten Objekten wie beispielsweise einem Ball assoziiert werden können. Der Begriff „realistische Bedingungen“ beinhaltet aber nicht nur ein realistisches Erscheinungsbild der Objekte und der Szene, sondern auch eine Anpassung der Entfernung (Tabelle 1) und der Geschwindigkeit (Tabelle 2) der Objekte an ökologisch relevante Werte.

	Brown (1931)	Rock (1967)	Wist (1976)	Epstein (1976)	McKee (1989)	Zohary (1993)	Distler (1997)
Entfernung [m]	3.3-10	0.45-1.80	1.2-1.45	1-5	0.28-0.57	a) 1-2 b) 0.9-1.9	10-160

Tabelle 1. Entfernungen der bewegten Objekte in Experimenten zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz.

	Brown (1931)	Rock (1967)	Wist (1976)	Epstein (1976)	McKee (1989)	Zohary (1993)	Distler (1997)
Winkel-Geschwindigkeit [Grad/s]	0.2-1.1	2.0-10.0	25-80	0.3-4.5	a) 0.5-4.0 b) 0.7-5.9	5-10	4.0-16.0
objektive Geschwindigkeit [m/s]	0.04-0.06	0.05-0.08	0.5-1.4	0.025-0.075	a) 0.018 - 0.070 b) 0.023 - 0.094	0.025-0.1	3.0

Tabelle 2. Wertebereiche für Winkel- und objektive Geschwindigkeiten in Experimenten zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz.

Die zur Durchführung der Versuche verwendete VR-Simulationsanlage erlaubt die Darstellung von real erscheinenden Szenarien bei gleichzeitiger Gewährleistung einer guten Kontrollierbarkeit der experimentellen Bedingungen. Die Durchführung der Versuche in der VR-Umgebung ermöglicht zudem eine gezielte Veränderung von Entfernungshinweisen. Damit ist es in unseren Experimenten erstmals möglich den Einfluss einer Reihe von Entfernungsrizen und deren Kombinationen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit zu untersuchen. Im Vergleich zu früheren Versuchsumgebungen vereinfacht die Verwendung perspektivischer Projektion in der Computer-Graphik die Darstellung unterschiedlicher Entfernungen. Alle Experimente können hier unter

Verwendung eines einzigen Versuchsapparates durchgeführt werden, ohne dabei laufend die Entfernung des Versuchsapparates ändern zu müssen.

7.6 Material und Methoden – Allgemeine Beschreibung

7.6.1 Versuchsumgebung

Mit einer Ausnahme wurden alle Experimente zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz in der zweiten und dritten Generation der VR-Simulationsumgebung durchgeführt. Die Versuchspersonen nahmen im Zentrum der zylinderförmigen Leinwand Platz, womit die Simulationsszene einen Bereich von ca. $180 \times 50^\circ$ im Gesichtsfeld der Versuchspersonen ausfüllte. Die räumliche Auflösung der Darstellung betrug 3544×1024 Pixel, die Frame- und die Videorate wurden auf 72 Hz eingestellt. In Versuchen mit stereoskopischer Darstellung wurde die Szene mit einer Auflösung von 2835×768 Pixeln projiziert. Die Bildwiederholrate betrug 48 Hz, die Videorate 96 Hz (je 48 Hz pro Auge). Aufgrund der Verwendung eines aktiven Stereoverfahrens zur Darstellung der Szene trugen die Versuchspersonen LCD-Shutterbrillen, um die stereoskopischen Bilder wahrnehmen zu können. Weitere Einzelheiten über die Eigenschaften der Simulationsumgebung können in Kapitel 5 und Anhang A nachgelesen werden.

7.6.2 Experimentelles Design

In fast allen früheren Arbeiten (Brown, 1931, Rock et al., 1967, Epstein et al., 1976, Zohary et al., 1993) erfolgte die Bestimmung der Geschwindigkeitskonstanz durch Aufgaben, die ein Abgleichen von zwei Geschwindigkeiten erforderten. Wir haben uns jedoch entschlossen ein 2-IFC-Verfahren zu verwenden, in dessen Verlauf den Versuchspersonen gleichzeitig zwei Reize präsentiert werden und sie dann entscheiden müssen, welcher der beiden Reize sich schneller bewegt hat. Ähnlich wie in der natürlichen Umwelt haben die Versuchspersonen bei Verwendung dieses Verfahrens keine Möglichkeit auf die Geschwindigkeit des Reizes einzuwirken. Währenddessen bedingt das Design der früheren Experimente die aktive Kontrolle der Versuchspersonen über die Geschwindigkeit eines Reizes, eine Situation die der natürlichen Umwelt höchstens bei der Bedienung ferngesteuerter Objekte zum Tragen kommt. Hinsichtlich der späteren Interpretation unserer Ergebnisse ist es wichtig zu vermerken, dass unser experimentelles Design wie auch jenes der meisten früheren Arbeiten ein Vergleichen der Geschwindigkeiten von zwei Objekten erfordert. Deshalb besitzen die Ergebnisse zwar Aussagekraft für Vergleichssituationen, es können jedoch keine eindeutigen Aussagen gemacht werden, inwieweit der Betrachter in der Lage ist die objektive Geschwindigkeit eines Gegenstandes ohne Vorhandensein eines Vergleichsobjektes einzuschätzen.

7.6.3 Versuchsdurchführung

In einem 2-IFC Paradigma wurden den Versuchspersonen 3D-Computer-Graphik-Modelle zweier Objekte präsentiert, die links und rechts der Bildschirmmitte versetzt waren und sich in Richtung der Bildschirmmitte bewegten. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, welches der beiden Objekte sich schneller bewegt. Mit Ausnahme eines Versuches (siehe Abschnitt 7.12 und Anhang A) handelte es sich bei den bewegten Objekten um 3D-Computer-Graphikmodell eines VW-Käfers (s.u. und Abb. 25). Um den Einfluss von Augenbewegungen zu minimieren, wurden die Versuchspersonen angewiesen, während der Dauer der Präsentation der Objekte in der Mitte des Bildschirms zu fixieren. Hierzu wurde zu Beginn eines jeden Versuchsdurchganges ein Fixationszeichen in Form eines modifizierten Stopzeichens in der Bildschirmmitte präsentiert. Sofern die beiden Fahrzeuge in unterschiedlichen Entfernungen präsentiert wurden, befand sich das Stopzeichen auf halben Weg zwischen den Fahrzeugen. 250ms nach dem Einblenden des Fixationszeichens erschienen beide Fahrzeuge in der Szene. Nach weiteren 250ms, während der sowohl das Fixationszeichen als auch die Fahrzeuge sichtbar waren, verschwand das Stopzeichen. Erneut 100ms später setzte die Bewegung des ersten Fahrzeuges ein, die Bewegung des zweiten Fahrzeuges setzte dagegen erst nach einer zufälligen Verzögerung ($0.1 \leq \Delta t \leq 0.25s$) ein. Vom Zeitpunkt des Beginns der Bewegung des zweiten Fahrzeuges waren beide Fahrzeuge für eine Sekunde sichtbar. Die Versuchspersonen wurden angewiesen mit ihrer Entscheidung, welches Fahrzeug sich schneller bewegte bis zum Ende des Versuchsdurchganges zu warten, da das plötzliche Einsetzen der Bewegung der Fahrzeuge zur Wahrnehmung einer Beschleunigung führt und somit die Ergebnisse verfälschen könnte. Die Versuchspersonen zeigten ihre Entscheidung durch das Drücken der linken bzw. rechten Pfeiltaste auf einer Standard-Tastatur an.

Eines der beiden Fahrzeuge, das sogenannte Standard-Fahrzeug wurde in jedem Versuchsdurchgang in einer simulierten Entfernung von 20m dargestellt und bewegte sich mit einer konstanten Geschwindigkeit ($3.0 \text{ m/s} = 10.8 \text{ km/h}$). Die Startposition des Fahrzeuges wurde zufällig gewählt, jedoch unter der Voraussetzung, dass das Fahrzeug am Ende eines Versuchsblocks gleich häufig links wie rechts der Bildschirmmitte präsentiert worden war. Das andere Fahrzeug (Test-Fahrzeug) wurde je nach Experiment in unterschiedlichen Entfernungen, von 10m bis 160m, präsentiert. In der Mehrzahl der Experimente wurden drei Test-Fahrzeuge verwendet, deren simulierte Betrachter-Objekt Entfernung 10, 20 und 40m betrug, wobei es sich bei diesen Werten um die Entfernungen der Straßen und nicht um die tatsächliche Entfernung der Fahrzeuge vom Betrachter handelt (siehe Abschnitt 7.7). Die Geschwindigkeit der Test-Fahrzeuge wurde durch Verwendung des bereits zuvor eingeführten adaptiven Schwellenverfahrens bestimmt (siehe Abschnitt 6.4 und Levitt, 1970). Zur Bestimmung des Punktes der subjektiven Gleichheit (PSG, siehe Abschnitt 6.4) war das Erreichen von sechs Umkehrungen des adaptiven Verfahrens notwendig.

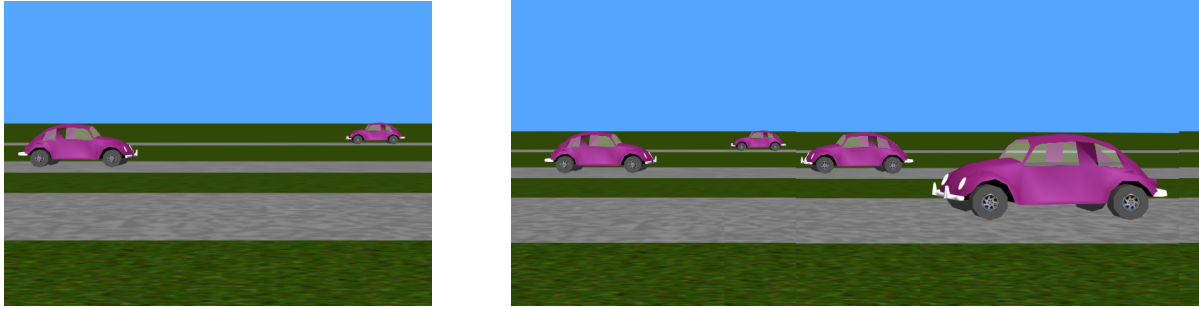


Abb. 25 Links: Erscheinungsbild der Szene in den Experimenten zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz. Es ist zu beachten, dass sich die Räder der Fahrzeuge während der Fahrt nicht gedreht haben. Rechts: Fotomontage, die auf der rechten Seite die Test-Fahrzeuge in allen drei getesteten Entfernungen darstellt.

Die simulierte Grundfläche setzte sich aus einer Wiese und drei Straßen zusammen (Abb. 25). Die Straßen verliefen quer zur Blickrichtung des Betrachters und hatten eine Breite von fünf Metern. Obwohl pro Versuchsdurchgang nur zwei Fahrzeuge präsentiert wurden, waren in jedem Versuchsdurchgang alle drei Straßen sichtbar. Auf diesem Wege sollte den Versuchspersonen die Konstanz der simulierten Umwelt „zugesichert“ werden.

Bei den Fahrzeugen handelte es sich um 3D-Computer-Graphikmodelle eines VW-Käfers. Das Modell bestand aus ca. 1000 Polygonen. Die vergleichsweise geringe Zahl der Polygone gewährleistete das Erreichen einer Bildwiederholrate von 72 Hz. Eine höhere Polygonzahl hätte zwar das Erscheinungsbild des VW Käfers verbessert, würde aber gleichzeitig eine Reduktion der Bildwiederholrate der Simulation bedingen. Die objektive Größe des Fahrzeuges betrug $1.2 \times 3.1 \times 1.2\text{m}$ (BxLxH). Unter Berücksichtigung der Entfernung der Fahrzeuge ergeben sich somit folgende Winkelgrößen: $14.8 \times 5.9^\circ$ (simulierte Entfernung der Straße: 10 m), $8.4 \times 3.3^\circ$ (20m) und $4.4 \times 1.3^\circ$ (40m). Bei einer objektiven Geschwindigkeit der Fahrzeuge von 3.0m/s ergeben sich somit folgende Winkelgeschwindigkeiten: $16.2^\circ/\text{s}$ (10m), $8.1^\circ/\text{s}$ (20m), $4.1^\circ/\text{s}$ (40m). Eine genaue Beschreibung der Entfernungen und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge erfolgt in Abschnitt 7.7.

7.6.4 Vorkehrungen und Anmerkungen

In der Beschreibung der Versuchsdurchführung haben wir bereits auf einige Vorkehrungen hingewiesen, die verhindern sollten, dass die Versuchspersonen die Anfangs- und Endposition der Fahrzeuge sowie die Zeitdauer der Bewegung zum Vergleich der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge heranziehen. Im einzelnen handelt es sich dabei um folgende Vorkehrungen:

- Die Startposition eines der Fahrzeuge wurde durch Hinzufügen eines zusätzlichen Versatzes von zufälliger Größe variiert. Damit die Versuchspersonen keine Vorhersagen über den Ort des Versatzes (links oder rechts) machen konnten wurde der Versatz pro Versuchsdurchgang zufällig dem linken oder rechten Fahrzeug zugewiesen.

- Der Start der Bewegung eines Fahrzeuges wurde um eine Zeitdauer Δt verzögert, wobei der Wert Δt per Zufallsgenerator aus dem Bereich $0.1s \leq \Delta t \leq 0.25s$ gewählt wurde. Die Zuweisung der Zeitverzögerung auf das linke und rechte Fahrzeug erfolgte per Zufallsgenerator:
- Die Position der Fahrzeuge und die Weglänge der Bewegung waren so bemessen, dass keines der Fahrzeuge die Bildschirmmitte überschritt. Somit kam es zu keinem Zeitpunkt des Versuchsdurchganges zu Überlappungen der Fahrzeuge in der Bildebene.
- Das Fixationszeichen wurde ausgeblendet bevor die Bewegung der Fahrzeuge einsetzte. Nach dem Ausblenden des Fixationszeichens befanden sich keine weiteren Referenzpunkte in der Szene, die den Vergleich der Geschwindigkeit durch eine Bezugnahme auf die relative Position zwischen den Fahrzeugen und dem Referenzpunkt ermöglicht hätten.
- Die Räder der Fahrzeuge haben sich nicht gedreht. Wie wir später zeigen werden, haben lokale Bewegungsinformationen wie das Drehen der Räder einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeitskonstanz.

7.7 Startposition der Fahrzeuge

Die Größe des Versatzes der Anfangs-Position der Fahrzeuge von der „Bildschirmmitte“ definierte sich unabhängig von der Beobachter-Fahrzeug-Entfernung in Metern. Somit war der Blickwinkel unter dem die Versuchspersonen die Fahrzeuge sahen um so kleiner je weiter das Fahrzeug vom Betrachter entfernt war.

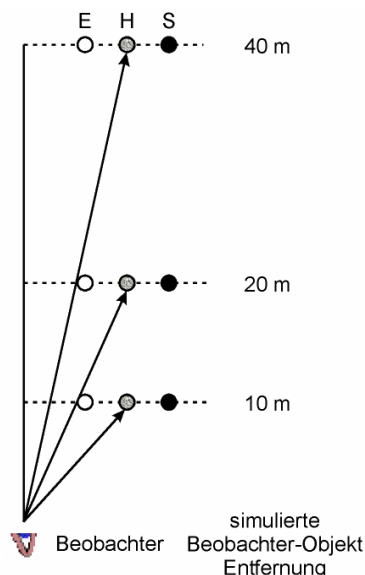


Abb. 26 Schematische Darstellung der Berechnung der tatsächlichen Beobachter-Fahrzeug-Entfernung (siehe Text).

Der Versatz eines Fahrzeuges von der Bildschirmmitte setzte sich aus mehreren Komponenten zusammen. Jedes Fahrzeug wurde zunächst um 4m von der Bildschirmmitte nach außen versetzt. Zu diesem Wert wurde die Weglänge des Fahrzeuges addiert, die sich aus seiner Geschwindigkeit und der Präsentationszeit ergibt. Bei einem der Fahrzeuge wurde dann noch zusätzlich ein per Zufallsgenerator bestimmter räumlicher Versatz hinzugefügt (siehe Abschnitt 7.6.4). Unter der Annahme, dass die Versuchspersonen in der Lage sind die objektive Geschwindigkeit der Fahrzeuge zu vergleichen, ergibt sich somit ein durchschnittlicher Wert des Versatzes von 7.5m (Position S, Abb. 26). Für die Blickwinkel unter welchen die Versuchspersonen die Fahrzeuge zu Beginn eines Versuchsdurchganges sahen ergeben sich Werte bei den unterschiedlichen Entfernungen der Fahrzeuge folgende Werte: 31.0° (Entfernung: 10m), 16.7° (20m) und 8.5° (40m). Die Endpunkte der Bewegung kommen unter diesen Bedingungen bei einem Versatz von 4.5m von der Mitte zu liegen (Position E, Abb. 26).²⁷ Aufgrund der Lage von Anfangs- und Endposition der Fahrzeuge sind die eigentlichen Beobachter-Fahrzeug-Entfernungen nicht 10, 20 und 40m (Entfernung der Straßen), sondern die tatsächliche Entfernung der Fahrzeuge ist etwas größer. Zur Berechnung dieser tatsächlichen (durchschnittlichen) Beobachter-Fahrzeug-Entfernung d_r haben wir die Position auf halben Weg des Fahrzeuges (Versatz: 6.0m, Position H, Abb. 26) herangezogen. Die sich ergebenden tatsächlichen Beobachter-Fahrzeug-Entfernungen der Fahrzeuge sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Entfernung der Straße [m]	tatsächliche Entfernung d_r [m]
10	11.7
20	20.9
40	40.5

Tabelle 3. Tatsächliche Entfernung der Test-Fahrzeuge in unseren Experimenten. Da die Fahrzeuge rechts und links der Bildschirmmitte versetzt waren, unterscheidet sich ihre tatsächliche Entfernung vom Betrachter von der Entfernung der Straßen.

7.8 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

7.8.1.1 Relative Geschwindigkeit

Zum besseren Verständnis der Darstellung und der Interpretation der Ergebnisse der Experimente werden wir im folgenden die grundlegenden Prinzipien der Analyse der Ergebnisse ausführlicher diskutieren. Durch die Verwendung des adaptiven Schwellenverfahrens liegen die Ergebnisse zunächst als Geschwindigkeiten am PSG vor, d.h. jene Geschwindigkeit eines Test-Fahrzeuges, bei welcher Test- und Standard-Fahrzeug als sich gleich schnell bewegend wahrgenommen werden. Da wir in den Experimenten untersuchen wollen, ob bzw. wie gut die Versuchspersonen die objektive Geschwindigkeit von Fahrzeugen vergleichen können, haben wir die relative Geschwindigkeit rG

²⁷ Zu Versuchsbeginn beträgt der Versatz 7.5m. Die Präsentationsdauer beträgt 1s; die Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges 3.0m/s. Hieraus ergibt sich ein durchschnittlicher Endpunkt der Bewegung bei 4.5 m.

eines Test-Fahrzeuges am PSG berechnet:

$$rG = \frac{\text{objektive Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges}}{\text{objektive Geschwindigkeit des Test-Fahrzeuges am PSG}}$$

Ist der Wert der relativen Geschwindigkeit größer als „1“, so wird die Geschwindigkeit des Test-Fahrzeuges relativ zur Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges überschätzt. Umgekehrt unterschätzen die Versuchspersonen die Geschwindigkeit des Test-Fahrzeuges, wenn rG einen Wert kleiner als „1“ annimmt. Hat rG einen Wert von genau „1“, so liegt perfekte Geschwindigkeitskonstanz vor (Abb. 27, schwarze Quadrate). Vergleichen die Versuchspersonen dagegen die Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge, hat rG nur dann einen Wert von „1“, wenn sich Test- und Standard-Fahrzeug in der gleichen Entfernung befinden. Zur Berechnung der Werte von rG , die unter diesen Bedingungen bei den beiden anderen Entfernungen zu erwarten sind, müssen wir zunächst die Winkelgeschwindigkeit $v\alpha$ des Standard-Fahrzeuges bestimmen. Allgemein gilt:

$$v\alpha = \frac{\text{ArcTan}\left(\frac{S}{act}\right) - \text{ArcTan}\left(\frac{E}{act}\right)}{\text{Präsentationsdauer}}$$

S und E sind die Werte des Versatzes der Fahrzeuge an der Anfangs- und Endposition der Bewegung (siehe Abb. 26), act steht für die tatsächliche simulierte Entfernung des Fahrzeuges (siehe Tabelle 3). Die Werte für $v\alpha$ sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tatsächliche Entfernung d_r [m]	Winkelgeschwindigkeit [$^{\circ}$ /s]
11.66	12.6
20.88	7.9
40.45	4.2

Tabelle 4. Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge in Abhängigkeit ihrer simulierten Entfernung vom Beobachter

Vergleichen die Versuchspersonen die Winkelgeschwindigkeiten der Fahrzeuge, so hätten alle Test-Fahrzeuge am PSE eine Winkelgeschwindigkeit von 7.9 $^{\circ}$ /s. Aus der tatsächlichen Entfernung d_r der Test-Fahrzeuge und ihrer Winkelgeschwindigkeiten $v\alpha$ ergeben sich die in Tabelle 5 dargestellten Werte der objektiven und relativen Geschwindigkeiten (siehe auch Abb. 27, rote Quadrate) der Fahrzeuge.

d_r [m]	Objektive Geschwindigkeit [m/s]	Relative Geschwindigkeit rG
11.7	1.96	1.52
20.9	3	1
40.5	5.75	0.52

Tabelle 5. Objektive und relative Geschwindigkeit der Test-Fahrzeuge am PSG für den Fall, dass die Versuchspersonen die Winkelgeschwindigkeiten der Fahrzeuge vergleichen.

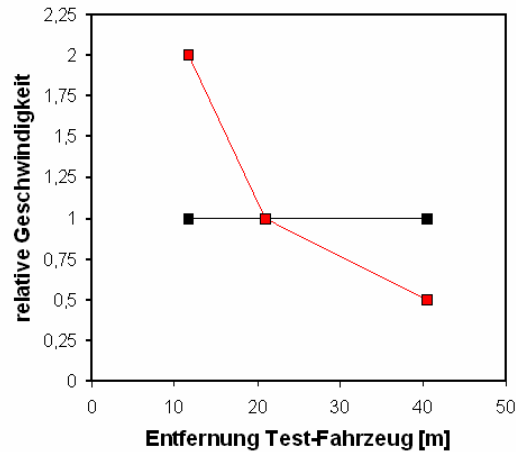


Abb. 27 Relative Geschwindigkeit der Test-Fahrzeuge am PSG in Abhängigkeit von ihrer Entfernung. Die schwarzen Quadrate zeigen die Werte, die für einen Vergleich der objektiven Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zu erwarten sind. Dagegen stellen die roten Quadrate die für einen Vergleich der Winkelgeschwindigkeiten erwarteten relativen Geschwindigkeiten dar.

In einigen wenigen Experimenten wird die Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges (Objektes) 1.5 m/s anstelle von 3.0m/s betragen. Die sich hieraus ergebenden Werte für d_r , $v\alpha$, objektive und relative Geschwindigkeit sind in Tabelle 6 dargestellt.

Entfernung der Straße [m]	d_r [m]	$v\alpha$ [°/s]	Objektive Geschwindigkeit [m/s]	relative Geschwindigkeit rG
10	10.5	7.76	0.83	1.81
20	20.3	4.18	1.50	1
40	40.1	2.13	2.95	0.51

Tabelle 6. Werte von d_r , $v\alpha$, objektiver und relativer Geschwindigkeit für eine Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges von 1.5 m/s.

7.8.1.2 Geschwindigkeitskonstanzfaktor

Um eine weitere Vereinfachung der Darstellung der Ergebnisse zu erreichen, führen wir im folgenden einen Geschwindigkeitskonstanzfaktor ein. Zur Berechnung des Faktors setzen wir voraus, dass die relative Geschwindigkeit rG einen Wert von genau „1“ hat, wenn die beiden Fahrzeuge in der gleichen Entfernung präsentiert werden. Eine Gerade, welche die Werte der relativen Geschwindigkeiten bei den Entfernungen 11.7 und 40.5m verbindet hat eine Steigung α (Abb. 28). Würden die Versuchspersonen die Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge vergleichen, ergäbe sich eine Gerade mit einer Steigung δ . Bei einer Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges von 3.0m/s hat δ einen Wert von -0.035 . α und δ fließen wie folgt in die Berechnung des Geschwindigkeitskonstanzfaktors vcf ein:

$$vcf = 100 * (1 - \frac{\alpha}{\delta})$$

Wenn die Versuchspersonen die Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge vergleichen wird vcf einen

Wert von Null haben. Dagegen hat v_{cf} beim Vergleich der objektiven Geschwindigkeiten der Fahrzeuge einen Wert von 100.

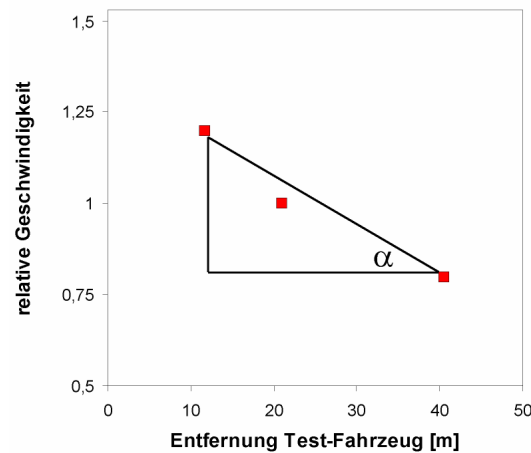


Abb. 28 Schematische Darstellung der Berechnung des Geschwindigkeitskonstanzfaktors. Die Datenpunkte der bei den Entfernungen 11,7m und 40,5m beobachteten relativen Geschwindigkeit werden durch eine Linie verbunden. Die Steigung α der Geraden kann dann zur Bestimmung des Geschwindigkeitskonstanzfaktors verwendet werden (siehe Text).

7.9 Gliederung der Experimente

Bei unserem ersten Experiment handelt es sich um ein Kontrollexperiment, um zu prüfen, ob und inwieweit wir Geschwindigkeitskonstanz unter den Bedingungen unserer VR-Simulationsanlage beobachten können. In einer nachfolgenden Serie von Experimenten untersuchen wir, wie sich Parameter des Versuchsaufbaus (Projektionsleinwand vs. CRT-Monitor), des experimentellen Verfahrens (monokulare vs. binokulare Betrachtung, gleichzeitige vs. aufeinanderfolgende Präsentation der Objekte, Augenbewegungen), bestimmte Objekt-Eigenschaften (Geschwindigkeit, Entfernung, Startposition, Bewegungsrichtung) auf die wahrgenommene Geschwindigkeit auswirken. Diese Experimente dienen in erster Instanz dazu eine bessere Charakterisierung der Geschwindigkeitskonstanz unter realistisch erscheinenden Bedingungen durchführen zu können.

Frühere Experimente haben zwar die Bedeutung der Entfernung für die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit diskutiert, in keinem Experiment wurde jedoch gezielt der Einfluss unterschiedlicher Entfernungshinweise auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit untersucht. Aus diesem Grund haben wir in unserem ersten Hauptexperiment eine gezielte Untersuchung des Einflusses einzelner Entfernungshinweise, sowie deren Kombinationen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit durchgeführt. Ein wichtiges Ergebnis dieses Experimentes wird der Nachweis des dominanten Einflusses der Größe des Objektes auf Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit sein. Um dem Einfluss der Größe genauer auf den Grund zu gehen, haben wir nachfolgend den Einfluss der Größe per se sowie die Bedeutung der bekannten Größe von Objekten

genauer untersucht. Im abschließenden Experiment haben wir versucht, durch die parallele Bestimmung von Größe, Geschwindigkeit und Entfernung der Fahrzeuge einen Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung dieser Größen herzustellen.

7.10 Geschwindigkeitskonstanz in einer virtuellen Umgebung

7.10.1 Einleitung

Im ersten Experiment zur Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz haben wir die Frage beantwortet, ob und inwieweit wir unter den ökologisch relevanteren Bedingungen unserer Versuchsumgebung, d.h. bei Präsentation einer realistisch erscheinenden Umwelt Geschwindigkeitskonstanz beobachten.

7.10.2 Versuchsdurchführung

Die einzelnen Aspekte der Versuchsdurchführung wurden bereits in Abschnitt 7.6.3 eingeführt. Das Standard-Fahrzeug bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 3.0 m/s in einer simulierten Beobachter-Objekt-Entfernung von 20.9 m. Die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit wurde für Test-Fahrzeuge in drei simulierten Fahrzeug-Betrachter Entfernungen (11.7, 20.9 bzw. 40.5 m) untersucht.

Acht Versuchspersonen mit normaler oder korrigierter Sehschärfe nahmen am Experiment teil. Jede Versuchsperson führte zunächst zur Eingewöhnung einen Block des Experimentes durch. Darauf folgten fünf Wiederholungen des experimentellen Blocks. Die Gesamtdauer des Experimentes inklusive Eingewöhnung betrug eine Stunde.

7.10.3 Ergebnis

Alle Versuchspersonen vergleichen die objektive und nicht die Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge (Abb. 29, links). Sechs von acht Versuchspersonen überschätzen die objektive Geschwindigkeit des nahen Fahrzeuges (11.7m), während sie die Geschwindigkeit des weiter entfernt dargestellten Fahrzeuges (40.5 m) unterschätzen. Dies bedeutet zwar, dass die Versuchspersonen keine perfekte Geschwindigkeitskonstanz zeigen (siehe auch Abb. 29, rechts), aber der durchschnittliche Wert des Geschwindigkeitskonstanzfaktors von 86 Prozentpunkten deutet eindeutig darauf hin, dass die Versuchspersonen die objektiven und nicht die Winkelgeschwindigkeiten der Fahrzeuge vergleichen. Zwei der acht Versuchspersonen zeigen ein eher unerwartetes Verhalten. Sie unterschätzen die Geschwindigkeit des nahen Fahrzeuges (11.7m) und überschätzen die Geschwindigkeit des in der Entfernung dargestellten Fahrzeuges (40.5m).

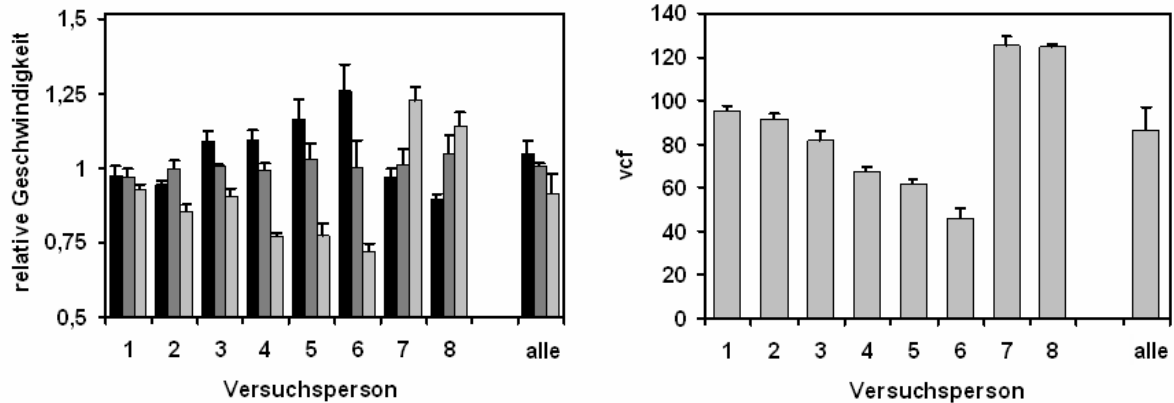


Abb. 29 Links: Der Graph zeigt die relative Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung der Test-Fahrzeuge (schwarzer Balken: 11.7m, mittelgrauer Balken: 20.9m, hellgrauer Balken: 40.5m). Die untere und obere Grenze des Graphen stehen für jene Werte, die bei einem Vergleich der Winkelgeschwindigkeiten der Fahrzeuge zu erwarten sind. Im Fall der einzelnen Versuchspersonen stellt jeder Balken den Mittelwert aus fünf Wiederholungen des Experimentes dar, dagegen berechnet sich der Wert für „alle“ Versuchspersonen aus den Mittelwerten der relativen Geschwindigkeiten aller Versuchspersonen. Die Größe des Fehlerbalkens entspricht einem Standardfehler des Mittelwertes.

7.10.4 Diskussion

Die Versuchspersonen vergleichen unter den Bedingungen unseres Experimentes eindeutig die objektiven und nicht die Winkelgeschwindigkeiten der Fahrzeuge. Wir konnten zwar keine perfekte Geschwindigkeitskonstanz ($vcf=86$) beobachten, aber unser Ergebnis ist in gutem Einvernehmen mit den Befunden früherer Arbeiten. Wird das Test-Fahrzeug in einer geringeren Entfernung als das Standard-Fahrzeug präsentiert, wird seine Geschwindigkeit im Vergleich zu der des Standard-Fahrzeuges überschätzt. Befindet sich das Test-Fahrzeug in einer größeren Entfernung als das Standard-Fahrzeug wird seine Geschwindigkeit unterschätzt.

7.11 Kontrollexperimente zur Evaluation des Parameterraumes

In der folgenden Serie von Experimenten haben wir den Einfluss einer größeren Zahl von Parametern und Versuchsbedingungen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit der Fahrzeuge untersucht. Die Experimente waren in erster Linie ausgelegt, um Geschwindigkeitskonstanz unter möglichst unterschiedlichen Bedingungen zu beschreiben. Die Ergebnisse dieser Experimente sollen ein Gefühl dafür vermitteln, unter welchen unterschiedlichen Bedingungen das visuelle System in der Lage ist Geschwindigkeitskonstanz zu erreichen. Im Rahmen der ersten drei Experimenten haben wir den Einfluss einiger Aspekte des von uns verwendeten experimentellen Verfahrens sowie des Versuchsaufbaus auf die wahrgenommene Geschwindigkeit untersucht. Die Experimente dienten damit vor allem dem Ausschluss von Artefakten. In weiteren Experimenten haben wir dann die Auswirkung von Veränderungen bestimmter Eigenschaften der bewegten Objekte auf die

Geschwindigkeitskonstanz untersucht. Da es sich bei allen Experimenten im weiteren Sinne um Kontrollexperimente handelt, erfolgt ihre Beschreibung in verkürzter Form. Die Ergebnisse der Experimente sind nicht nur beschreibender Natur, sondern sie legen den Grundstein für das experimentelle Design und die Auswahl der Parameter in den Hauptexperimenten.

7.11.1 Einfluss der Größe des Bildschirmes (Monitor vs. Projektionsleinwand)

Kommentare der Versuchspersonen deuteten auf ein realistischeres Erscheinungsbild der Versuchsszene hin, wenn sie auf der Projektionsleinwand statt auf einem Bildschirm dargestellt wurde. Bei der Darstellung auf der Leinwand entspricht die Größe der Fahrzeuge in der Projektionsebene eher ihrer natürlichen Größe als dies bei der Darstellung auf dem Bildschirm der Fall ist. Um einen eventuellen Einfluss der „aktuellen Größe“ der Fahrzeuge auf die wahrgenommene Geschwindigkeit zu untersuchen, haben wir das Geschwindigkeitskonstanz-Experiment sowohl auf einem CRT-Monitor (35x28cm) als auch auf der Projektionsleinwand durchgeführt. Die Darstellung auf der Projektionsleinwand war so bemessen, dass die Größe des Gesichtsfeldes unter beiden Versuchsbedingungen (62.5°x50°) gleich war. Aufgrund der begrenzten Größe des Gesichtsfeldes war es notwendig die Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges auf 1.5 m/s zu reduzieren.

Unter beiden Bedingungen erhalten wir einen vergleichbaren Grad an Geschwindigkeitskonstanz. Wir schließen hieraus, dass die aktuelle Größe der Fahrzeuge keine Rolle spielt. Prinzipiell hätte uns dies die Möglichkeit zur einer Durchführung der weiteren Experimente auf dem Bildschirm gegeben. Allerdings wären wir dann gezwungen gewesen die Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf 1.5 m/s beschränken zu müssen. Um höhere Geschwindigkeiten (3.0m/s) und gleichzeitig auch größere Objekte (z.B. Lkw) verwenden zu können, wurden die weiteren Experimente auf der Projektionsleinwand durchgeführt.

7.11.2 Monokulare und Binokulare Betrachtung der Szene

Die Oberfläche von Bildschirmen und Projektionsleinwänden stellt bei binokularer Betrachtung einen starken Entfernungshinweis dar, der zu Verzerrungen des wahrgenommenen Raumes der simulierten Szene führen kann. Diese Verzerrungen könnten sich über die wahrgenommene Entfernung negativ auf die Geschwindigkeitskonstanz auswirken. Bei Betrachtung der Szene mit nur einem Auge treten diese Verzerrungen nicht auf. Die Ergebnisse eines Experimentes, das Geschwindigkeitskonstanz bei monokularer und binokularer Betrachtung der Szene untersuchte, bestätigten obige Vermutung jedoch nicht. Die Versuchspersonen konnten die objektive Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf der Leinwand gleich gut einschätzen, unabhängig davon, ob die Szene mit einem oder mit zwei Augen betrachtet wurde.

7.11.3 Gleichzeitige vs. sequentielle Präsentation der Fahrzeuge

Die gleichzeitige Präsentation der Objekte in unseren Experimenten könnte dazu führen, dass Versuchspersonen trotz aller Vorkehrungen „Time-to-Contact“-Mechanismen verwenden, um die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zu vergleichen. Unter „Time-to-Contact“ ist in diesem Zusammenhang eine Strategie zu verstehen, bei der die Versuchspersonen zu Beginn eines Versuchsdurchganges die Mitte der Wegstrecke zwischen den beiden Fahrzeugen abschätzen. Das Fahrzeug, das am Ende des Versuchsdurchganges näher an diesen Punkt herankommt, wäre somit das schnellere Fahrzeug. Eine Verwendung dieser Strategie kann vermieden werden, indem die Fahrzeuge nacheinander dargestellt werden. Die Versuchspersonen werden somit gezwungen, die Geschwindigkeiten auf der Basis einer Repräsentation der Geschwindigkeit zu vergleichen. Da die Ergebnisse eines Experimentes mit gleichzeitiger und aufeinander folgender Präsentation der Fahrzeuge den gleichen Grad an Geschwindigkeitskonstanz aufweisen, können wir die Verwendung von „Time-to-Contact“- Mechanismen mit hoher Sicherheit ausschließen.

7.11.4 Einfluss der Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges

Wie wirkt sich eine Veränderung der absoluten Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit aus? Aufgrund technischer Beschränkungen waren diese Untersuchungen auf zwei Geschwindigkeiten, 1.5 (5.4 km/h) und 3.0 m/s (10.8 km/h) beschränkt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den untersuchten Geschwindigkeiten kein Unterschied in der Geschwindigkeitskonstanz zu beobachten ist.

7.11.5 Geschwindigkeitskonstanz in unterschiedlichen Entfernungen

In den bisherigen Experimenten betrug die maximale Entfernung der Test-Fahrzeuge vom Beobachter 40m. Unter diesen Bedingungen zeigen die meisten Versuchspersonen einen hohen Grad an Geschwindigkeitskonstanz. Wie wirkt sich eine Erhöhung der maximalen Entfernung der Objekte auf zunächst 80 und dann 160m auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit aus? In anderen Worten, ist der Beobachter auch bei großen Entfernungen in der Lage die objektive Geschwindigkeit der Fahrzeuge korrekt einzuschätzen. Das Standard-Fahrzeug wurde dabei in Entfernungen von 40 bzw. 80m vom Betrachter dargestellt. Während zwei von vier Versuchspersonen den gleichen Grad an Geschwindigkeitskonstanz bei allen Entfernungen der Test-Fahrzeuge an den Tag legten, zeigte sich bei der dritten Versuchsperson ein schwacher Effekt und bei der vierten Versuchsperson ein starker Effekt bei zunehmender Entfernung der Test-Fahrzeuge. Allerdings war das Verhalten beider Versuchspersonen eher unerwartet, da sie die Geschwindigkeit von Fahrzeugen, die sich in einer größeren Entfernung als das Standard-Fahrzeug zu liegen kamen, überschätzten, während sie die Geschwindigkeit von Fahrzeugen, die sich in einer geringeren Entfernung bewegten, unterschätzten. Erwartet hatten wir aber genau das entgegengesetzte Verhalten, d.h. ein Unterschätzen

der Geschwindigkeit der fernen und Überschätzen der Geschwindigkeit der nahen Fahrzeuge.

Im zweiten Teil des Experimentes wurden die Test-Fahrzeuge in Entfernungen dargestellt, die sich nicht wie bisher um den Faktor zwei, sondern um den Faktor vier von der Entfernung des Standard-Fahrzeuges unterschieden. Das Standard-Fahrzeug wurde nun in einer simulierten Entfernung von 40m, die Test-Fahrzeuge wurden in 10, 40 und 160m Entfernung vom Betrachter dargestellt. Die Ergebnisse zeigen ein ähnliches Muster wie im ersten Teil dieses Experimentes: Bei zwei Versuchspersonen hat die größere Entfernung zwischen den Fahrzeugen keinen Einfluss auf die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit, während bei der dritten Versuchsperson ein schwacher und bei der vierten Versuchsperson ein sehr starker Effekt, erneut in entgegengesetzter Richtung zu beobachten ist.

7.11.6 Bewegungsrichtung der Fahrzeuge

Frühere Untersuchungen und auch die meisten Experimente dieser Arbeit haben sich ausnahmslos mit einem Spezialfall der Geschwindigkeitskonstanz beschäftigt. In den Experimenten bewegten sich die Objekte ausschließlich senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters. Unter diesen Bedingungen ändert sich die Entfernung eines Objektes kaum. In der natürlichen Umwelt stellt die beschriebene Bewegungsrichtung aber nur eine von vielen möglichen Richtungen dar. Allen anderen Bewegungsrichtungen ist gemein, dass sich die Entfernung des Objektes vom Beobachter im Verlauf der Bewegung ändert. Inwieweit der Beobachter in der Lage ist, die Bewegungsrichtung des Objektes in die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit einzubeziehen, haben wir im folgenden Experiment untersucht. Während sich das Standard-Fahrzeug immer senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters bewegte, erfolgte die Bewegung der Test-Fahrzeuge entweder in der gleichen Richtung oder, die Fahrzeuge bewegten sich in einem Winkel von 45° relativ zur Blickrichtung des Beobachters (siehe Abb. 30). Das Experiment wurde in zwei Bedingungen durchgeführt: (1) die Fahrt der Fahrzeuge wurde in einer „komplexen Umwelt“ simuliert (Abb. 31, rechts) oder (2) die Fahrzeuge fuhren auf einer Grasfläche (einfache Umwelt, Abb. 31, links).

Der Grad an Geschwindigkeitskonstanz hängt nur unwesentlich von der Bewegungsrichtung des Test-Fahrzeuges ab. Bei einer Bewegung der Fahrzeuge senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters ist eine geringfügige Verbesserung der Geschwindigkeitskonstanz im Vergleich zur einer Bewegungsrichtung von 45° zu verzeichnen. Interessant ist, dass die Verwendung einer komplexen Szene bei Fahrzeugen, die sich mit einem relativen Winkel von 45° zur Blickrichtung bewegen zumindest für nahe Fahrzeuge zu einer Verbesserung der Geschwindigkeit führt.

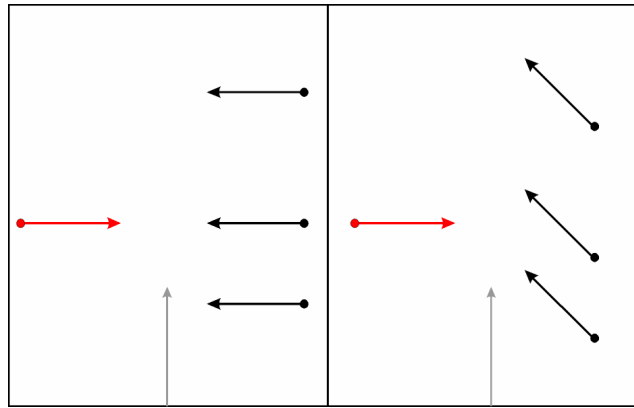


Abb. 30 Schematische Darstellung der Bewegungsrichtung der Standard- und Test-Fahrzeuge. Der graue Pfeil zeigt die Blickrichtung des Beobachters, der rote Pfeil stellt die Bewegungsrichtung des Standard-Fahrzeugs dar. Im linken Teil der Darstellung bewegen sich die drei Test-Fahrzeuge (schwarze Pfeile) senkrecht zur Blickrichtung des Betrachters (Kontrollgruppe). In der zweiten Bedingung, die im rechten Teil der Abbildung dargestellt ist, bewegen sich die Test-Fahrzeuge in einem Winkel von 45° zur Blickrichtung des Beobachters.



Abb. 31 Der linke Teil der Abbildung zeigt die simulierte Versuchsumgebung in der Bedingung „einfache Umwelt“. Im rechten Teil der Abbildung sind die Fahrzeuge in eine „komplexe Umwelt“ eingebettet.

7.11.7 Peripheres Sehen und Geschwindigkeitskonstanz

In früheren Untersuchungen wurden die Reize zumeist foveal präsentiert. Wie verändert sich die wahrgenommene Geschwindigkeit von Objekten in der Peripherie des Auges? Ist ein eventueller Effekt der Ekkzentrität unabhängig von der Entfernung der Objekte? Um diese Fragestellungen zu untersuchen, wurden die Fahrzeuge an ihrer Startposition unabhängig von der Entfernung unter dem gleichen Sehwinkel dargestellt. Im Gegensatz hierzu wurden die Fahrzeuge in den vorangehenden Experimenten in Abhängigkeit von ihren Entfernungen unter unterschiedlichen Sehwinkeln präsentiert. Je weiter ein Fahrzeug entfernt war, desto näher befand es sich an der Bildschirmmitte (Abb. 26).

Die Ergebnisse zeigen, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit von der Kombination Sehwinkel und Entfernung eines Fahrzeuges abhängt. Während der Grad an Geschwindigkeitskonstanz bei Präsentation der entfernten Fahrzeuge im zentralen Gesichtsfeld relativ hoch ist, wird unter den Bedingungen des vorliegenden Experimentes ein signifikanter Rückgang der Geschwindigkeitskonstanz verzeichnet.

7.11.8 Integration von Augenbewegungssignalen

Es ist bekannt, dass durch glatte Augenfolgebewegungen die wahrgenommene Geschwindigkeit eines Objektes reduziert wird (Aubert-Fleischl-Paradox). In den bisherigen Experimenten waren die Versuchspersonen angewiesen worden in der Mitte des Bildschirms zu fixieren. Damit wurde sicher gestellt, dass Augenbewegungen sich nicht auf die wahrgenommene Geschwindigkeit auswirken. Wäre nicht die Entfernung der Fahrzeuge unterschiedlich gewesen, könnten ihre Geschwindigkeiten direkt auf der Basis der retinalen Geschwindigkeit verglichen werden.

Um zu untersuchen, inwieweit die Versuchspersonen Augenbewegungssignale in die Wahrnehmung der Geschwindigkeit von Objekten einbeziehen können, haben wir die Versuchspersonen angewiesen, eines der beiden Fahrzeuge mit den Augen zu verfolgen. Welches der Fahrzeuge Ziel der glatten Augenfolgebewegung war, wurde den Versuchspersonen zu Beginn eines jeden Versuchsdurchganges angezeigt. Unter diesen Bedingungen unterscheiden sich die Geschwindigkeiten der zwei Fahrzeuge auf der Netzhaut des Auges sehr stark voneinander. Während das Zielobjekt der Augenfolgebewegung je nach Verstärkungsfaktor der Augenfolgebewegung eine retinale Geschwindigkeit von Null hat, berechnet sich die retinale Geschwindigkeit des zweiten Objektes aus der Geschwindigkeit und Richtung der Augenbewegung und der Winkelgeschwindigkeit und Richtung des zweiten Fahrzeuges. Der Vergleich der Ergebnisse dieses Experimentes mit den Daten eines Kontrollexperimentes, bei dem die Versuchspersonen in der Mitte der Projektionsfläche fixierten ergibt eindeutig, dass die Versuchspersonen Augenbewegungen bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit der Fahrzeuge berücksichtigen. Der Grad an Geschwindigkeitskonstanz unterscheidet sich unter den einzelnen Bedingungen nicht signifikant.

7.11.9 Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluationsexperimente

Die Ergebnisse der Ergebnisse dieser Serie von Experimenten zeigt, dass es sich bei der Geschwindigkeitskonstanz um eine robuste Wahrnehmungsleistung handelt, die unter einer Vielzahl von Bedingungen beobachtet werden kann.

- Größe der Darstellung, aktuelle Größe der Objekte (Monitor oder Projektionsleinwand)
- Monokulare oder binokulare Betrachtung
- Gleichzeitige oder aufeinanderfolgende Präsentation
- Absolute und relative Entfernung der Fahrzeuge
- Absolutgeschwindigkeit der Fahrzeuge
- Bewegungsrichtung der Fahrzeuge
- Integration von Augenbewegungssignalen

Nur in der Peripherie des Gesichtsfeldes kommt es zu einem Einbruch der Geschwindigkeitskonstanz. Das visuelle System ist in der Peripherie zwar sehr bewegungssensitiv,

was aber nicht notwendigerweise gleichbedeutend mit einer hohen Genauigkeit bei der Geschwindigkeitswahrnehmung ist. Vielmehr ist es Zweck der Bewegungssensitivität, dass die Aufmerksamkeit des visuellen Systems an den betreffenden Ort gelenkt wird. Sofern die Bewegung oder der Gegenstand „interessant“ genug sind, kommt es zu einer Augenbewegung in deren Folge der bewegte Gegenstand im zentralen Gesichtsfeld sichtbar wird.

7.12 Der Einfluss lokaler Bewegungsinformation auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit

7.12.1 Einleitung

Im täglichen Leben stehen dem Menschen zur Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit von sich aktiv bewegenden Gegenständen Informationen zur Verfügung, deren Eigenschaften unabhängig von der Betrachter-Gegenstand-Entfernung sind. Diese Eigenschaften ermöglichen zumindest aus theoretischer Sicht eine Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit des betreffenden Gegenstandes ohne dabei seine Winkelgeschwindigkeit, seine Entfernung oder den Quotienten aus Weg und Zeit berücksichtigen zu müssen. Beispielsweise kann die objektive Geschwindigkeit eines rollenden Balles durch Informationen über seine Dreh-Geschwindigkeit und seinen Umfang rekonstruiert werden. Gleiches gilt für die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges, die auf der Basis des Reifen-Umfangs und der Dreh-Geschwindigkeit des Reifens erschlossen werden kann. Die potentielle Möglichkeit die objektive Geschwindigkeit des Fahrzeuges anhand der Reifendrehungen rekonstruieren zu können war ausschlagend für unsere Entscheidung keine Drehungen der Fahrzeug-Reifen in den betreffenden Experimenten zuzulassen. Ähnlich gestaltet sich die Situation bei der Fortbewegung eines Fußgängers. Die Kombination aus Schrittweite und Schrittfrequenz ermöglicht es dem Betrachter gezielte Aussagen über die Geschwindigkeit des Fußgängers zu machen. Zur Vereinfachung werden wir im weiteren Verlauf die entfernungsunabhängigen Informationen bewegter Körper unter dem Begriff “lokale Bewegungsinformation” zusammenfassen.

Prinzipiell ermöglicht die Auswertung lokaler Bewegungsinformationen somit die Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes, ohne dabei auf die in Abschnitt 7.3.8 definierten Strategien zurückgreifen zu müssen. Da aber die Auswertung der lokalen Bewegungsinformation mit zunehmender Entfernung immer schwieriger wird – je nach Muster eines Balles kann seine Drehgeschwindigkeit schon in kleinen Entfernungen nicht mehr korrekt wahrgenommen werden – vermuten wir, dass lokale Bewegungsinformation die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit zwar im Nahbereich unterstützt, aber aufgrund der genannten Einschränkungen nicht allein für die wahrgenommene Geschwindigkeit verantwortlich zeichnen wird.

7.12.2 Allgemeine Beschreibung des Versuchsdesigns

Der Versuchsablauf entspricht im wesentlichen dem der Fahrzeugexperimente. Anstelle der Fahrzeuge verwendeten wir ein einfaches 3D-Modell eines Fußgängers („Roboterfigur“, Abb. 32). Das Modell zeigte beim Gehen je nach Versuchsbedingung ein typisches Muster an Arm- und Beinbewegungen. Der Standard-Roboter bewegte sich mit einer simulierten Geschwindigkeit von 1.5m/s. Anstelle des Stopzeichens wurde ein Kreuz als Fixationszeichen verwendet.

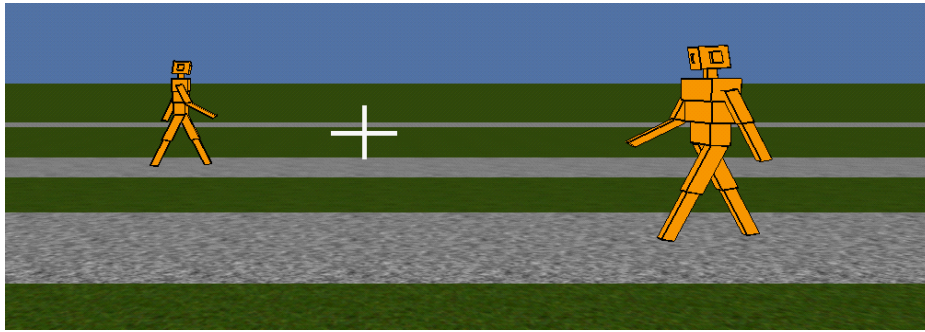


Abb. 32 Roboter-Experiment: Der digitale Schnappschuss zeigt eine Momentaufnahme zu Beginn eines Versuchsdurchganges.

7.12.3 Computer-Graphik 3D- Modell der Robotfigur

Die Roboterfigur setzte sich aus 16 entsprechend skalierten Kopien eines einzigen Grundbausteins – eines Würfels – zusammen.²⁸ Zur besseren Sichtbarkeit der einzelnen „Körperteile“ der Figur wurden die gouraud-schattierten Flächen der Würfel mit einer schwarzen Linie umrandet. Wir haben uns aus zwei Gründen für die Verwendung eines einfachen Modells eines Fußgängers entschieden. Erstens, die geringe Zahl der Polygone garantiert das Erreichen einer hohen Bildwiederholrate (72 Hz). Zweitens, der Versuch, das von uns entwickelte einfache Bewegungsmodell des Roboters auf eine realistischer erscheinende Figur (Abb. 33, rechts) zu übertragen, führte zu einem unnatürlichen Erscheinungsbild der Bewegung dieser Figur. Dies war der Fall, obwohl sich diese Figur in die gleichen grundlegenden Körperteile gliederte (Oberschenkel, Unterschenkel, Oberarm, etc.) wie das Modell des Roboters (Abb. 33, links).²⁹ Unsere Beobachtung wird auch von den Ergebnissen einer anderen Untersuchung unterstützt (Hodgins, O’Brien & Tumblin, 1997). Dort wurden Versuchspersonen paarweise Animationen von zwei unterschiedlichen virtuellen Charakteren präsentiert. Bei einem Charakter handelte es sich um eine Strichfigur, bei dem anderen um ein relativ naturgetreues polygonales 3D-Modell eines Menschen. Jede paarweise Präsentation zeigte zwei Animationen unter Verwendung des gleichen Charakters, allerdings unterschiedlich das verwendete Bewegungsmodell in den beiden Präsentationen. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu

²⁸ Bei den 16 Bauteilen des Roboters handelt es sich um: Kopf, 2 Augen, Nase, Hals, 3 Würfel zur Definition des Oberkörpers, 2 Oberarme, 2 Unterarme, 2 Unterschenkel, 2 Oberschenkel

²⁹ Die vergleichsweise große Polygonzahl (7000) der zweiten Figur führte zu Einbrüchen in der Bildwiederholrate (24 Hz anstelle von 72 Hz).

entscheiden, ob innerhalb eines Paares zwei unterschiedliche Bewegungsmodelle verwendet worden waren. Während die Versuchspersonen im Fall der Strich-Figur selbst große Änderungen des Bewegungsmodells nicht wahrnahmen, genügte bei Verwendung des realistischen Modells bereits kleine Änderungen, um Unterschiede im Bewegungsmodell entdecken zu können. Folglich erleichtert uns die Verwendung einer einfachen Figur das Erstellen eines Bewegungsmodells, da der Betrachter in diesem Fall Fehler und Ungenauigkeiten im Bewegungsmodell als nicht störend empfand.



Abb. 33 Der linke Teil der Abbildung zeigt den in unseren Experimenten verwendeten Robot-Fußgänger, während im rechten Teil der Abbildung das 3D-Modell eines Fußgängers mit einem realistischeren Erscheinungsbild dargestellt ist.

7.12.4 Bewegungsmodell der Roboterfigur

Das Design der Geschwindigkeitskonstanzexperimente erfordert eine Bewegung der Figuren mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Wir erreichten dies, indem sich der Oberkörper des Roboters mit konstanter Geschwindigkeit bewegte. Im Gegensatz hierzu definiert sich bei einem “realen” Fußgänger die Geschwindigkeit des Oberkörpers über die Geschwindigkeit der Schritte. Da diese ein regelmäßiges Muster aus Beschleunigen und Abbremsen zeigen (Abb. 34), schlägt sich dies, wenn auch mit reduzierter Amplitude auch auf die Geschwindigkeit des Oberkörpers nieder. Somit ergab sich bei der Definition des Bewegungsmodells des Roboters die Problematik, dass der Oberkörper des Roboters aufgrund des experimentellen Designs ein vergleichsweise unnatürliches Bewegungsverhalten an den Tag legte.

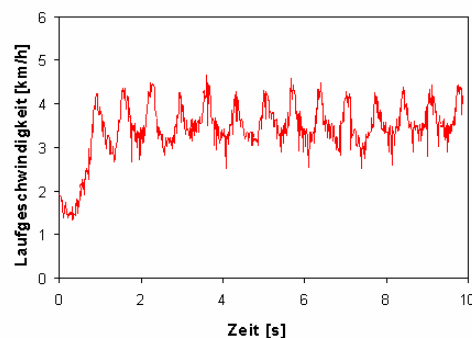


Abb. 34 Geschwindigkeitsmuster während des Gehens auf einem Laufband. Die Daten wurden in einem Experiment zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen propriozeptiven und visuellen Faktoren bei der Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung aufgenommen (Distler, Pelah, Bell, Thurrell, 1998; Thurrell, Pelah, Distler, 1998).

Eine auf Grundlage der Beine basierte Animation der Figur durch inverse Kinematik (Ko, Badler, 1996), aber auch andere auf einer heuristischen Vorgehensweise basierende Bewegungsmodelle, konnten wir aufgrund der oben genannten Einschränkungen nur bedingt als Ausgangspunkt beim Erstellen eines Bewegungsmodells heranziehen. Um eine Bewegung des Oberkörpers mit einer konstanten Geschwindigkeit zu erreichen, fungierte dieser bei unserer Roboterfigur als Schrittmacher (Abb. 35). Die Geschwindigkeit der anderen Körperteile berechnete sich aus der Geschwindigkeit und Orientierung des Oberkörpers sowie der Eigenbewegung der Körperteile (Schwingen der Arme und Beine). Zur Animation der Beine gingen wir von einer Basisgeschwindigkeit des Roboters von 1.5m/s aus. Bei dieser Geschwindigkeit betrug die Schrittweite der Figur 0.5 m. Sofern sich die Geschwindigkeit der Roboterfigur von dem Basiswert unterschied, wurde die Schrittweite der Figur auf der Grundlage einer logarithmischen Beziehung zwischen Schrittweite und Geschwindigkeit angepasst. Durch das gleichzeitige Verändern von Schrittweite und Schrittfrequenz sollte verhindert werden, dass die Versuchspersonen die Geschwindigkeit der Roboterfigur allein durch das Bestimmen der Schrittweite bzw. der Schrittfrequenz erschließen können.

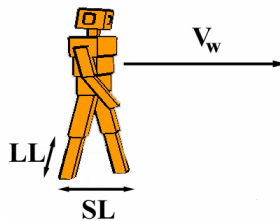


Abb. 35 Die Geschwindigkeit der Roboterfigur definierte sich durch die Geschwindigkeit des Oberkörpers V_w . Die Schrittweite SL sowie die Schrittfrequenz der Roboterfigur ergaben sich aus der Geschwindigkeit V_w des Roboters und der Länge seiner Beine ($2 * LL$).

Um ein "natürliches Erscheinungsbild" des animierten Roboters zu erhalten, bewegten sich dessen Arme und Beine in Gegenphase, d.h. bewegte sich da linke Bein nach vorne, so wurde der linke Arm nach hinten bewegt. Ferner bewegten sich der Unterarm bzw. Unterschenkel relativ zum Oberarm bzw. Oberschenkel. Der Schwerpunkt des Roboters bewegte sich in Richtung der Fortbewegung auf einer Sinuskurve deren Amplitude und Frequenz durch die Laufgeschwindigkeit des Roboters definiert wurde. Eine Reihe weiterer zum Teil geringfügiger Rotationen und Translationen einzelner Körperteile führten zu einem kompakten Bewegungsmuster bei der Animation des Roboters.

7.12.5 Vorkehrungen

Um zu verhindern, dass die Versuchspersonen die Geschwindigkeiten der beiden Roboterfiguren auf der Basis der relativen Positionen und der Dauer der Bewegung vergleichen, haben wir die gleichen Vorkehrungen wie in den Fahrzeug-Experimenten getroffen (siehe Abschnitt 7.6.4). Bei Verwendung der Roboterfiguren ist aber ferner denkbar, dass die Versuchspersonen die Anzahl oder

die Frequenz der Schritte als ein Maß für die Geschwindigkeit der Roboterfiguren verwenden. Die Bestimmung der Schrittzahl wurde durch zwei Vorkehrungen erschwert. Erstens bewegten sich die Roboter für eine unterschiedliche Zeitdauer, zweitens haben wir die Ausgangsstellung der Beine der Roboterfiguren in der Startposition während eines jeden Versuchsdurchganges variiert (Abb. 36). Innerhalb eines Versuchsdurchganges nahmen Standard- und Test-Roboterfigur niemals die gleiche Ausgangsstellung ein.

Indem eine Zunahme der Geschwindigkeit des Roboters sowohl durch die Schrittweite als auch die Schrittfrequenz getragen wurde erreichten wir, dass die Änderungen eines jeden Parameters vergleichsweise gering ausfielen. Hiermit versuchten wir zu vermeiden, dass die Versuchspersonen die Geschwindigkeit der Roboterfiguren ausschließlich auf der Basis ihrer Schrittfrequenz vergleichen.

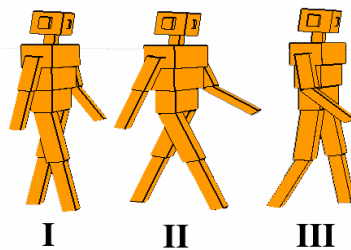


Abb. 36 Die Bilder I-III zeigen die verwendeten Ausgangsstellungen der Beine der Roboterfiguren zu Beginn eines Versuchsdurchganges. Da sich entweder das linke oder das rechte Bein in der vorderen Position befinden konnte, ergaben sich somit insgesamt sechs unterschiedliche Ausgangsstellungen.

7.12.6 Kontrollexperiment: Der Einfluss der Schrittweite auf die wahrgenommene Geschwindigkeit

7.12.6.1 Einleitung

Obwohl die von uns getroffenen Vorkehrungen eine ausschließliche Bestimmung der Geschwindigkeit der Roboterfigur durch die Auswertung von Informationen über die Schrittweite und Schrittfrequenz unwahrscheinlich machen, haben wir in einem Kontrollexperiment den Zusammenhang zwischen Schrittweite und Schrittfrequenz und der wahrgenommenen Geschwindigkeit des gesamten Roboters untersucht.

7.12.6.2 Versuchsdurchführung

In einem 2-IFC Paradigma wurden den Versuchspersonen zwei sich bewegende Roboterfiguren – inklusive der Arm- und Beinbewegungen präsentiert. Sowohl der Standard- als auch der Test-Roboter wurden in einer simulierten Entfernung von 20.3m dargestellt. Die Standard-Roboterfigur bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 1.5 m/s, ihre Schrittweite betrug 0.5m. Zur Untersuchung des Einflusses von Schrittweite und Schrittfrequenz wurden drei Test-Roboterfiguren mit

unterschiedlichen Schrittlängen (0.25, 0.50, 0.75m) verwendet. Die Präsentation der Reize erfolgte in einem nicht abgedunkelten Raum auf einem CRT-Monitor. Die Entfernung der Versuchspersonen vom Bildschirm betrug 50cm, womit das Bild einen Bereich von 40x30° m Gesichtsfeld der Versuchspersonen einnahm.

7.12.6.3 Beziehung zwischen Schrittweite, Schrittfrequenz und Geschwindigkeit des Roboters

Da die Schrittweite der Test-Roboter festgelegt war, wählten wir im Gegensatz zu dem im folgenden beschriebenen Hauptexperiment an Stelle eines logarithmischen, einen linearen Zusammenhang zwischen Schrittweite und der Geschwindigkeit der Roboterfigur. Abb. 37 zeigt den Zusammenhang zwischen Schrittweite, Schrittfrequenz und Geschwindigkeit der Roboterfiguren für die drei untersuchten Schrittweiten.

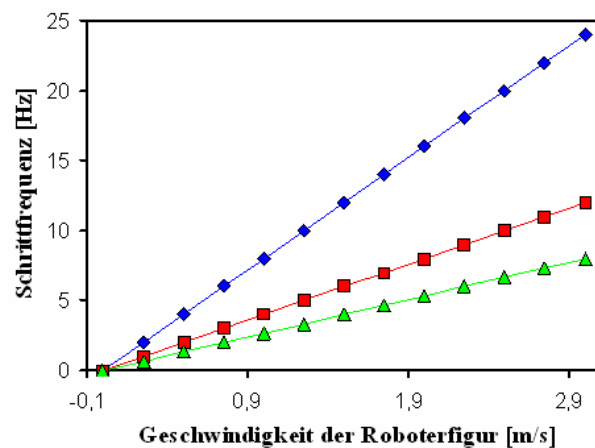


Abb. 37 Beziehung zwischen Schrittfrequenz und der Laufgeschwindigkeit der Roboterfigur für drei unterschiedliche Schrittweiten (0.25 m: blau; 0.5 m: rot; 0.75 m: grün).

Sofern die Versuchspersonen die Geschwindigkeit der Roboterfigur ausschließlich auf der Basis der Schrittweite und Schrittfrequenz bestimmen, ist ein starker Einfluss beider Parameter auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Roboterfigur zu erwarten.

Acht Versuchspersonen mit normaler oder korrigierter Sehschärfe nahmen am Experiment teil. Jede Versuchsperson führte insgesamt sechs Wiederholungen des Experimentes durch, wobei die Daten des ersten Versuchsblockes nicht in die Auswertung einbezogen wurden.

7.12.6.4 Ergebnis

Die wahrgenommene Geschwindigkeit der Bewegung der Roboterfiguren hängt nicht von der Schrittweite und somit auch nicht von der Schrittfrequenz der Roboterfiguren ab (Abb. 38). Diese Beobachtungen werden auch durch die Ergebnisse einer ANOVA, welche die Interaktion zwischen Schrittweite und Geschwindigkeit untersuchte, bestätigt ($F(2,14) = 1.453$; $p = 0.27$).

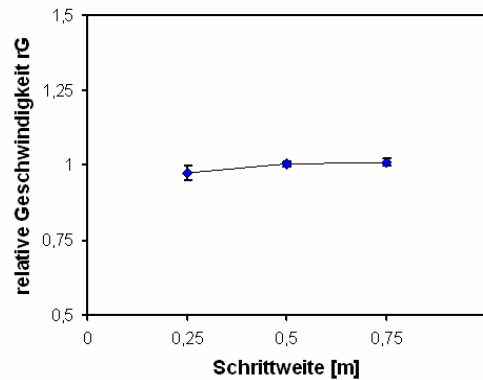


Abb. 38 Relative Geschwindigkeit rG der Test-Roboterfigur in Abhängigkeit von der Schrittweite. Jeder Datenpunkt stellt dem Mittelwert aus 8 Versuchspersonen dar, die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

7.12.6.5 Schlussfolgerung

Obwohl die Kommentare aller Versuchspersonen einen signifikanten Einfluss der Schrittweite auf die wahrgenommene Geschwindigkeit der Roboterfigur erwarten ließen - je kleiner die Schrittweite war desto schneller schien sich der Roboter zu bewegen - finden wir in unserem Experiment keinen Hinweis auf einen signifikanten Einfluss der Schrittweite und der Schrittfrequenz. Aufgrund dieses Ergebnisses können wir das alleinige Verwenden der Schrittfrequenz und Schrittweite zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Roboters mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen.

7.12.7 Objektive Geschwindigkeit und lokale Bewegungsinformation

7.12.7.1 Einleitung

Nachdem wir die ausschließliche Bestimmung der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Roboterfigur auf der Basis der Schrittweite und der Schrittweite ausgeschlossen hatten, war es nun möglich, den Einfluss lokaler Bewegungsinformation auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Figur zu untersuchen.

7.12.7.2 Versuchsdurchführung

Die Standard-Roboterfigur bewegte sich in einer Entfernung von 20.3m mit einer Geschwindigkeit von 1.5m/s. Die Arme und Beine der Standard-Figur waren animiert. Den Einfluss lokaler Bewegungsinformation haben wir durch Verwendung von zwei Typen von Test-Robotern untersucht. Beim ersten Typ Roboter bewegten sich Arme und Beine genau wie beim Standard-Roboter. Währenddessen waren die Arme und Beine des zweiten Roboter-Typs nicht animiert, womit sich das Erscheinungsbild einer unter Fremdeinwirkung angeschobenen Figur ergab. Den Einfluss lokaler Bewegungsinformation haben wir für drei Entfernungen der Test-Roboter untersucht (10.5, 20.3,

40.1m). Die Szenen wurden auf der Leinwand der VR-Simulationsanlage präsentiert, wobei wir allerdings nur einen Bildkanal zur Projektion der Szene verwendet haben.

Drei Versuchspersonen mit normaler oder korrigierter Sehschärfe nahmen am Experiment teil. Jede Versuchsperson führte insgesamt sieben Wiederholungen des Experimentes durch, wobei die ersten zwei Versuchsblöcke zur Eingewöhnung dienten.

7.12.7.3 Ergebnis

Die Verfügbarkeit lokaler Bewegungsinformationen führt bei kleinen Entfernungen (10.5m) zu einer eindeutigen Verbesserung der wahrgenommenen Geschwindigkeit der Roboterfigur (Abb. 39), während bei großen Entfernungen kein derartiger Einfluss zu beobachten ist. Dies wird durch die Ergebnisse eines zweiseitigen t-Tests bestätigt. Bei einer Entfernung des Test-Roboters von 10.5m zeigt sich eine signifikante Verbesserung der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ($p < 0.01$), während für die Entfernungen 20.3 und 40.1m kein signifikanter Einfluss ($p >> 0.01$) gefunden werden konnte.

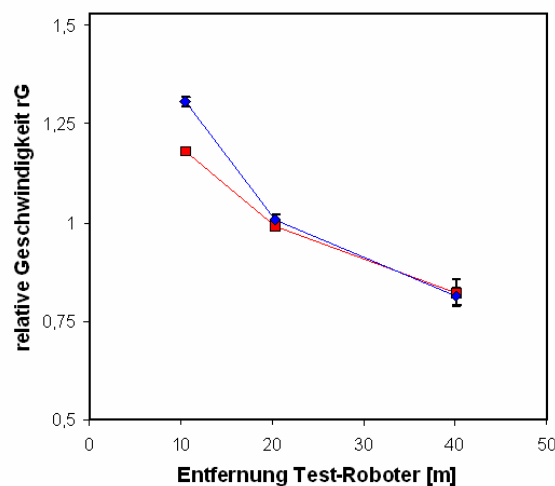


Abb. 39 Relative Geschwindigkeit rG des Test-Roboters am PSG in Abhängigkeit von seiner Entfernung und der Verfügbarkeit lokaler Bewegungsinformation (blau: „steife“ Figur, rot: animierte Figur). Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert aus den Messungen von drei Versuchspersonen dar (fünf Messungen pro Versuchsperson). Die Größe der Fehlerbalken beträgt +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

7.12.7.4 Diskussion

Die Verfügbarkeit lokaler Bewegungsinformationen führt wie vermutet bei relativ geringen, nicht aber bei größeren Entfernungen zu einer Verbesserung der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit der sich bewegenden Roboterfigur. Wir folgern, dass die lokale Bewegungsinformation, sofern sie selbst hinreichend genau zu erkennen ist, zwar die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit unterstützen kann, dass die Information aber auf der anderen Seite nicht zuverlässig genug ist, um ausschließlich auf ihrer Basis die objektive Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes zu bestimmen.

7.13 Einfluss von Entfernungshinweisen auf die Geschwindigkeitskonstanz

7.13.1 Einleitung

Die folgenden Experimente werden sich systematisch mit dem Einfluss von sogenannten Tiefen- oder auch Entfernungshinweisen (siehe Kaufman, 1982 und Sedgwick, 1986 für einen Überblick über Tiefenhinweise) auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit beschäftigen. Der Begriff „Tiefenhinweis“ beinhaltet in der vorliegenden Notation nicht notwendigerweise, dass sich die betreffende Information über die Wahrnehmung der Betrachter-Fahrzeug Entfernung auf die Wahrnehmung von deren objektiver Geschwindigkeit auswirken muss. Da die Versuchspersonen in unseren Experimenten die Geschwindigkeit von zwei Fahrzeuge vergleichen, können sich Tiefenhinweise wie Bewegungsparallaxe und Disparität alternativ auch auf die Wahrnehmung der relativen Entfernung zwischen den Fahrzeugen auswirken (Johnson, Cumming, Landy, 1994). Frühere Arbeiten zur Geschwindigkeitskonstanz haben zwar die Bedeutung der Entfernung für die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes intensiv diskutiert, aber die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Tiefenhinweise bzw. deren Kombinationen auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit hat sich auf ein Minimum beschränkt. Wir werden uns im folgenden auf einer deskriptiven Ebene intensiv mit dem Einfluss einzelner, aber auch kombinierter Tiefenhinweise auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit auseinander setzen. Die Verwendung unterschiedlicher Kombinationen von Tiefenhinweisen ermöglicht es uns, Aussagen über die Gewichtung einzelner Tiefenhinweise zu machen (Landy, Maloney, Johnston, Young, 1995; Norman, Todd, Perotti, Tittle, 1996). Während die Kombination und Integration multipler Tiefenhinweise im Zusammenhang mit dem Tiefensehen bereits gut untersucht ist (Richards, 1985; Bülthoff, Mallot, 1988; Rogers, Collet, 1989; Tittle, Braunstein, 1991; Johnson, Cumming, Parker, 1993; Johnson et al. 1994), gibt es im Bereich der Geschwindigkeitskonstanz kaum Untersuchungen zur Integrationen mehrerer Informationsquellen. Die Möglichkeit der gezielten Manipulation und Kontrolle der Tiefenhinweise sowie die Möglichkeit auch widersprüchliche Kombinationen von Tiefenhinweisen³⁰ in der VR-Simulationsumgebung zu erzeugen sind besonders wertvoll, wenn es um eine Untersuchung des individuellen, aber auch des kombinierten Einfluss von Tiefenhinweisen auf die wahrgenommene Geschwindigkeit geht.

Das vorrangige Ziel des folgenden Experimentes war es, den- oder diejenigen Tiefenhinweise zu identifizieren, die den stärksten Einfluss auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ausüben. Falls es sich dabei um mehrere Faktoren handelt, sollte gleichzeitig festgestellt werden, in welcher Form die Information von zwei oder mehreren Tiefenhinweisen kombiniert wird.

³⁰ Beispiel für eine widersprüchliche Situation: Während alle Tiefenhinweise entsprechend einer vergrößerten Entfernung eines Gegenstandes angepaßt werden, verändert sich seine Größe in der Bildebene nicht, d.h. die objektive Größe des Gegenstandes wächst mit zunehmender Entfernung.

7.13.2 Versuchsdurchführung

Den Einfluss von Tiefenhinweisen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit der Fahrzeuge haben wir in acht unterschiedlichen Versuchsbedingungen untersucht. In allen Versuchsbedingungen bewegte sich das Standard-Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 3.0m/s in einer simulierten Entfernung von 20.9m. Die drei Test-Fahrzeuge wurden wie zuvor in den Entfernungen 11.7, 20.9 und 40.5m simuliert. Bei der Lektüre der nachfolgenden Beschreibung der einzelnen Versuchsbedingungen empfehlen wir, Abb. 40 in die Betrachtungen einzubeziehen.

- Bedingung 1: Wie im ersten Experiment (siehe Abschnitt 7.10) wurde die Bewegung der Fahrzeuge auf einer Grundfläche inklusive der Darstellung der Straßen simuliert. Die Augenhöhe des simulierten Betrachters betrug 1.5m. Die Darstellung der Szene erfolgte mittels perspektivischer Projektion (Standard-Bedingung, Abb. 40a).
- Bedingung 2: Die Grundfläche samt Straßen wurde entfernt. Den Versuchspersonen wurde somit einerseits die Information des Texturgradienten sowie andererseits die durch die Straßen vermittelte Entfernungsinformation vorenthalten (Abb. 40b).
- Bedingung 3: Die Grundfläche wurde wieder in die Szene eingeführt, dafür wurde jedoch die simulierte Augenhöhe auf 0.0m gesetzt. Unter diesen Bedingungen kommen die Fahrzeuge unabhängig von ihrer Entfernung in der gleichen Höhe zu liegen (Abb. 40c).
- Bedingung 4: Die simulierte Augenhöhe betrug erneut 1.5m. Die objektive Größe des in 11.7m dargestellten Fahrzeuges wurde halbiert, während die Größe des in 40.5m dargestellten Fahrzeuges verdoppelt wurde. Somit haben die Test-Fahrzeuge aller Entfernungen die gleiche Größe in der Bildebene (Abb. 40d).
- Bedingung 5: Die Konfiguration der Szene entsprach Bedingung 1 mit dem Unterschied, dass die Darstellung in stereoskopischer Projektion erfolgte. Der simulierte Vergenzpunkt befand sich in einer Entfernung von 3.5m (Entfernung der Leinwand).
- Bedingung 6: Die Konfiguration der Szene entsprach der Konfiguration von Bedingung 1, allerdings wurde eine Bewegung des Betrachters in der Szene mit einer Geschwindigkeit von 1.0 m/s simuliert (Bewegungsparallaxen-Information). Die simulierte Bewegung des Betrachters war so bemessen, dass der Betrachter auf halber Strecke seiner Bewegung seinen ursprünglichen Standpunkt (statische Bedingungen) passierte.
- Bedingung 7: Diese Bedingung ist eine Mischung aus den Bedingungen 5 und 6. Die Präsentation erfolgte in stereoskopischer Projektion inklusive einer simulierten Bewegung des Betrachters.
- Bedingung 8: wie Bedingung 7, inklusive der Größenmanipulationen von Bedingung 4, d.h. die Größeninformation steht im Widerspruch zur Information, die durch die restlichen Tiefenhinweise vermittelt wird.

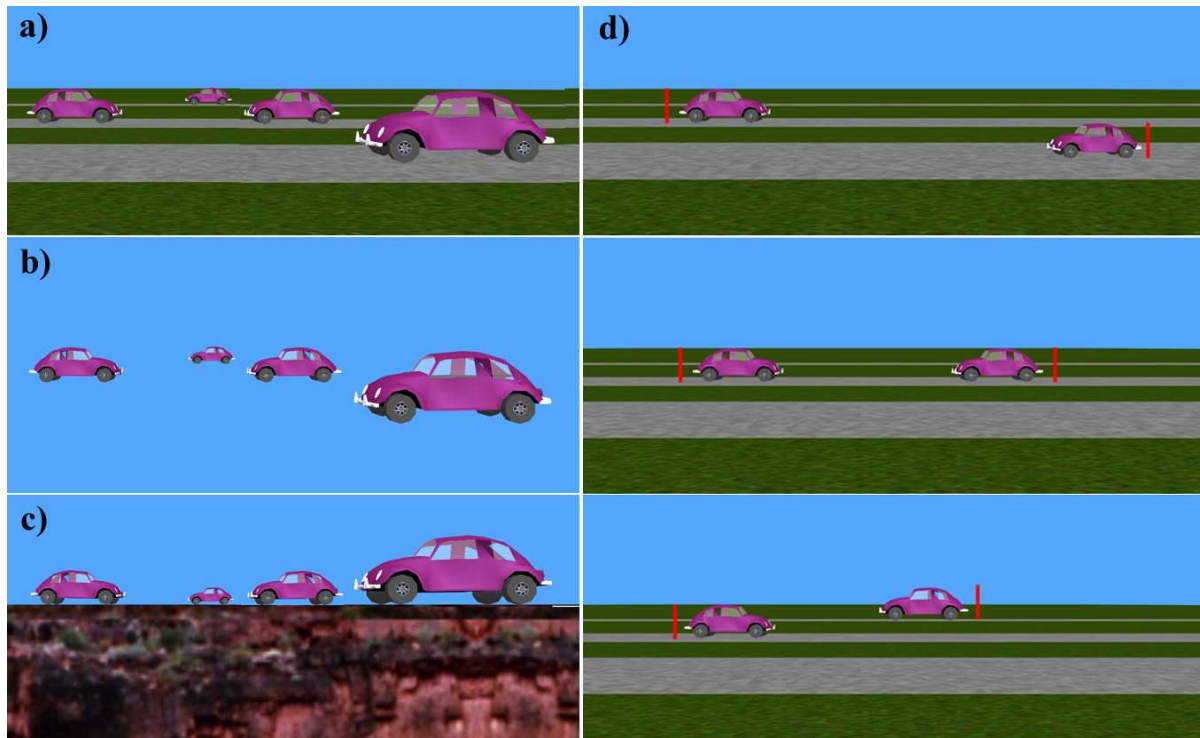


Abb. 40 Die Fotomontagen zeigen Versuchsbedingungen mit unterschiedlicher Verfügbarkeit von Tiefenhinweisen. a) Standard-Situation (Bedingung 1) b) Die Grundfläche wurde entfernt (Bedingung 2). c) Die simulierte Augenhöhe des Betrachters wurde auf 0.0m gesetzt (Bedingung 3). d) Die Größe der Test-Fahrzeuge wurde so manipuliert, dass alle Fahrzeuge die gleiche Größe in der Bildebene haben. Die roten Linien waren während der Versuche nicht sichtbar, sie dienen hier ausschließlich der Verdeutlichung der Größenmanipulation. Alle Linien befinden sich in der Bildebene und sind gleich lang (Bedingung 4).

Im folgenden sind die verfügbaren Tiefenhinweise in den einzelnen Versuchsbedingungen noch einmal zusammengefasst.

- Bedingung 1: Größe, Lage der Straße, Texturgradient, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld
- Bedingung 2: Größe, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld
- Bedingung 3: Größe, Lage der Straße, Texturgradient,
- Bedingung 4: Lage der Straße, Texturgradient, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld
- Bedingung 5: Größe, Lage der Straße, Texturgradient, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld, Disparität
- Bedingung 6: Größe, Lage der Straße, Texturgradient, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld, Bewegungsparallaxe
- Bedingung 7: Größe, Lage der Straße, Texturgradient, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld, Disparität, Bewegungsparallaxe
- Bedingung 8: Lage der Straße, Texturgradient, Höhe der Fahrzeuge im Gesichtsfeld

Am Experiment nahmen drei Versuchspersonen teil. Jede Versuchsperson hatte bereits am Basis-Experiment teilgenommen, weshalb wir hier auf die Durchführung eines Versuchsblocks zur Eingewöhnung verzichtet haben. Die fünf Wiederholungen einer jeden Versuchsbedingung wurden

am Stück durchgeführt. Zu Beginn einer jeden Versuchsbedingung wurden den Versuchspersonen einige Versuchsdurchgänge präsentiert, um sie somit an die neue Konfiguration der Szene zu gewöhnen. Das gesamte Experiment wurde in mehreren Sitzungen durchgeführt. Pro Sitzungen wurden 2-3 Versuchsbedingungen getestet. Die Gesamtdauer des Experimentes betrug ca. 8-10 Stunden.

7.13.3 Ergebnis

Wie Abb. 41 zeigt, haben die Versuchspersonen mit Ausnahme von Bedingung 7 die objektive Geschwindigkeit des weiter entfernten Fahrzeuges unterschätzt, während sie die Geschwindigkeit des in der geringeren Entfernung dargestellten Test-Fahrzeuges relativ zur Geschwindigkeit des Standard-Fahrzeuges überschätzten. In der Standardbedingung (Bedingung 1) erhalten wir einen Wert des Geschwindigkeitskonstanzfaktors vcf von ca. 82, was in guter Übereinstimmung mit dem im ersten Experiment beobachteten Wert von 86 Prozentpunkten ist. Das Entfernen der Grundfläche (Bedingung 2) wirkt sich durch einen schwachen Rückgang des Wertes von vcf um 8 auf 74 Prozentpunkte aus. Mit 14 Prozentpunkten fällt der Rückgang in Bedingung 3 (Augenhöhe: 0.0m) etwas stärker aus. Den stärksten Rückgang des Wertes von vcf beobachten wir in Bedingung 4. Das Entfernen der Größe der Fahrzeuge als Tiefenhinweis führt zu einem Rückgang von vcf um 28 Prozentpunkte ($p < 0.01$, t-test).

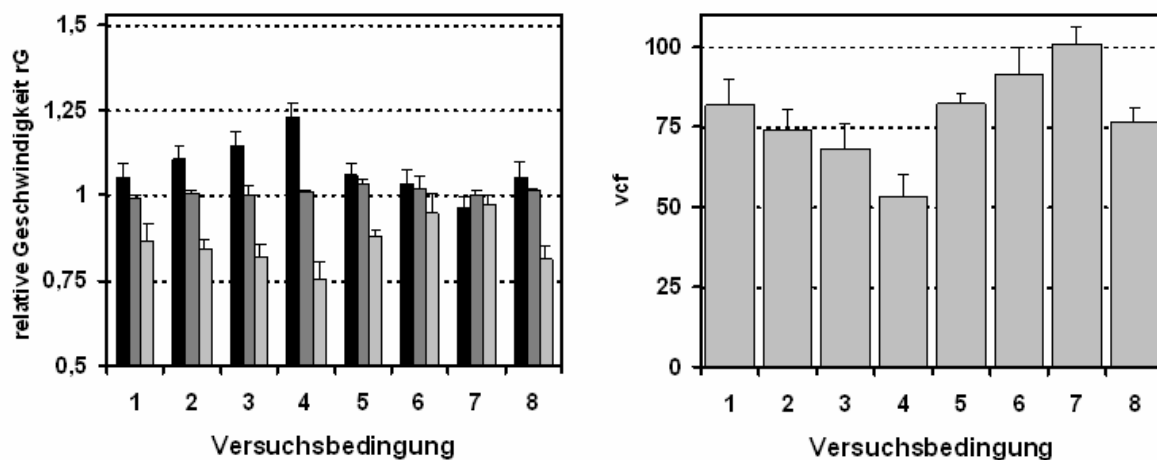


Abb. 41 Das linke Diagramm zeigt die relativen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung. (Entfernung des Test-Fahrzeuges: schwarze Balken: von 11.7m, mittelgraue Balken: 20.9m, hellgraue Balken: 40.5m). Im rechten Diagramm ist der Wert des Geschwindigkeitskonstanzfaktors vcf in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung dargestellt. Jeder Balken entspricht dem Mittelwert aus 3 Versuchspersonen (fünf Wiederholungen pro Versuchsperson). Die Größe der Fehlerbalken entspricht einem Standardfehler des Mittelwertes.

Beim Hinzufügen von Disparitätsinformation (Bedingung 5) bleibt der Wert von vcf nahezu unverändert, während Bewegungsparallaxe (Bedingung 6) zu einem geringfügigen Zuwachs um 9 Prozentpunkte führt. Die Kombination von Disparitätsinformation und Bewegungsparallaxe

(Bedingung 7) führte aus Sicht der Ergebnisse von Bedingung 5 und 6 zu einem unerwarteten Zuwachs um 18 Prozentpunkte ($p < 0.05$, t-test). Das erneute Entfernen der Größeninformation (Bedingung 8) führte ähnlich wie in Bedingung 4 zu einem signifikanten Rückgang des Wertes des Geschwindigkeitskonstanzfaktors um 24 Prozentpunkte ($p < 0.01$, t-test).

7.13.4 Diskussion

Die korrekte Darstellung der Größeninformation stellt die wichtigste Voraussetzung dafür dar, dass die Versuchspersonen in der Lage sind die objektive Geschwindigkeit der Fahrzeuge korrekt einzuschätzen. Das Entfernen der Größeninformation führte in beiden Versuchsbedingungen (4 und 8) zu einem signifikanten Rückgang der wahrgenommenen Geschwindigkeit von ähnlicher Größenordnung (Bedingung 4: 28, Bedingung 8: 24 Prozentpunkte). Besonders bemerkenswert ist der Rückgang des Wertes des Geschwindigkeitskonstanzfaktors in Bedingung 8, denn hier stehen dem Betrachter mit Ausnahme der Größe alle restlichen in unserem Experiment verfügbaren Tiefenhinweise zur Verfügung. Der von uns gefundene dominante Einfluss der Größe auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit bestätigt unter realistischen Bedingungen die Ergebnisse früherer Experimente (Brown, 1931; Epstein & Cody, 1980; Zohary & Sittig, 1993).

Selbst vergleichsweise drastische Veränderungen der Szene, wie sie in Bedingung 2 durch das Entfernen der Grundfläche und in Bedingung 3 durch die Nivellierung der Augenhöhe erzeugt wurden, führen nur zu einem vernachlässigbar geringen Rückgang der Geschwindigkeitskonstanz. Während Disparitätsinformation und Bewegungsparallaxe in individueller Form keinen signifikanten Effekt auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit haben, führt die Kombination der beiden Informationstypen zu einer signifikanten Zunahme der Geschwindigkeitskonstanz. Der Kombinationseffekt ist somit größer als die Summe der Einzeleffekte (Johnson et al., 1994).

7.14 Der Einfluss der Größe von Objekten auf die Geschwindigkeitskonstanz

7.14.1 Einleitung

Im vorangegangenen Experiment hat sich ein dominanter Einfluss der Information über die Größe der Fahrzeuge auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit gezeigt. Um die Verfügbarkeit von Größeninformation als Tiefenhinweis auszuschließen, hatten wir in den Bedingungen 4 und 8 des Experimentes die Größe der Test-Fahrzeuge in den unterschiedlichen Entfernungen so bemessen, dass ihre Größe in der Bildebene identisch war. Um im folgenden den Einfluss der Größe der Fahrzeuge auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit genauer zu untersuchen, haben wir den Versuchspersonen in allen simulierten Betrachter-Fahrzeug Entfernungen Test-Fahrzeuge in drei unterschiedliche Größen präsentiert.

7.14.2 Versuchsdurchführung

Das Standard-Fahrzeug wurde in einer simulierten Entfernung von 20.9m dargestellt. Es bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 3.0m/s. Die Größe des Standard-Fahrzeuges dient als Referenzwert (100%) zur Beurteilung der Größe der Test-Fahrzeuge. In allen untersuchten Entfernungen der Test-Fahrzeuge (11.7, 20.9, 40.5m) wurden die Test-Fahrzeuge in drei unterschiedlichen Größen dargestellt (50%, 100%, 200% der Größe des Standard-Fahrzeuges). Um ferner den Einfluss von Umweltbedingungen auf den Größeneffekt zu untersuchen, wurde das Experiment in drei Bedingungen durchgeführt. In Bedingung 1 (Abb. 42 a-c) betrug die Augenhöhe des Betrachters 1.5m. Die Grundfläche samt Straßen kam zur Darstellung. In Bedingung 2 (Abb. 42 d) betrug die simulierte Augenhöhe des Betrachters 0.0m. Bedingung 3 (Abb. 42 e) unterscheidet sich von Bedingung 1, indem die simulierte Grundfläche entfernt wurde. Die simulierte Augenhöhe des Betrachters betrug 1.5m.

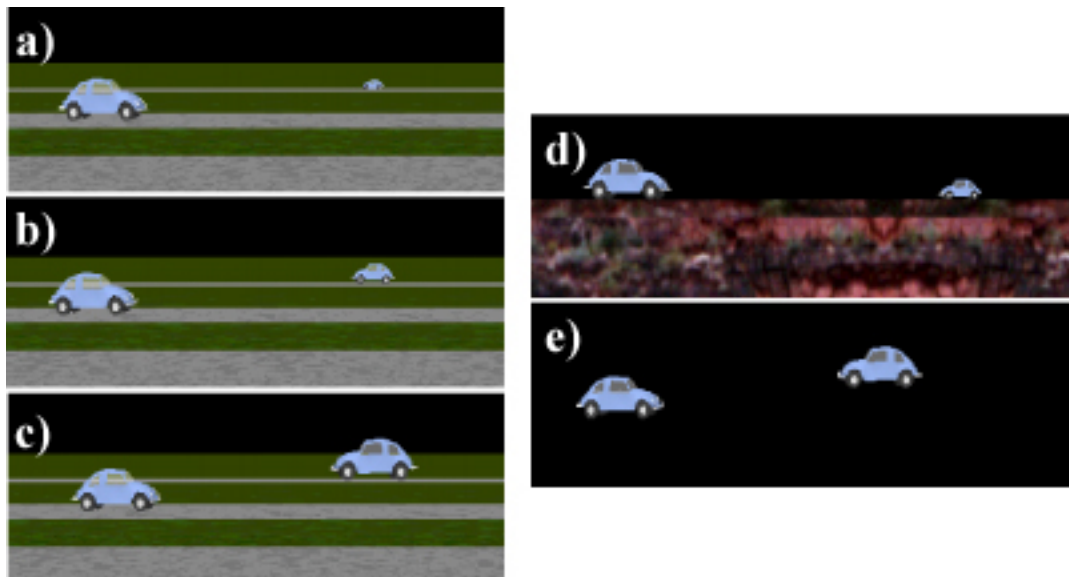


Abb. 42 Die digitalen Schnappschüsse zeigen die einzelnen Versuchsbedingungen des Experimentes zur Untersuchung des Einflusses der Größe der Fahrzeuge auf die Geschwindigkeitskonstanz. Auf der linken Seite (a-c) sind alle drei Größen des Test-Fahrzeuges (rechts) dargestellt (a) 50%, b) 100%, c) 200%). Der Einfluss der Größe der Test-Fahrzeuge wurde in drei Bedingungen getestet. Die Abbildung a)-c) stellen die Standardbedingung (Szene + Augenhöhe 1.5m) dar, während in d) die simulierte Augenhöhe des Betrachters auf 0.0m gesetzt wurde. In e) betrug die Augenhöhe des simulierten Betrachters erneut 1.5m, jedoch wurde die simulierte Grundfläche aus der Szene entfernt.

Am Experiment nahmen vier (Bedingung 1 & 2) bzw. drei (Bedingung 3) Versuchspersonen teil. Jede Versuchsperson führte zur Eingewöhnung einen Block des Experimentes durch. Nachfolgend führte jede Versuchsperson fünf Wiederholungen einer jeden Versuchsbedingung durch.

7.14.3 Ergebnis

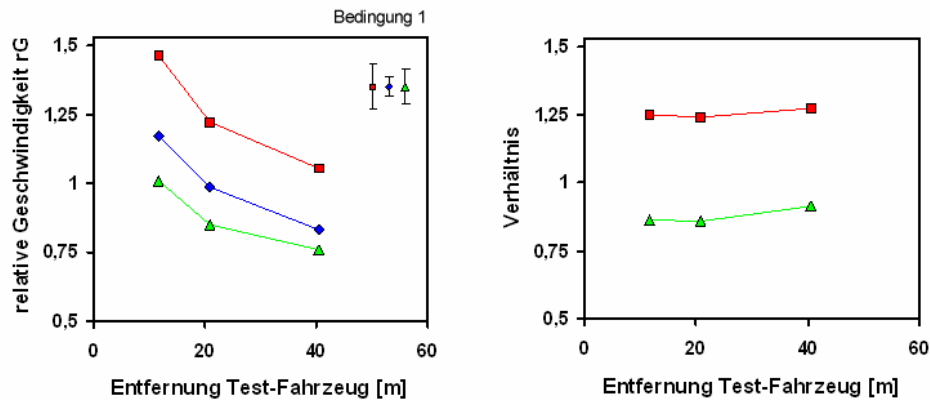


Abb. 43 Ergebnisse Bedingung 1; Links: Relative Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung und der Größe des Test-Fahrzeugs (rot: 50%, blau: 100%, grün: 200%). Jeder Datenpunkt stellt den Mittelwert aus 4 Versuchspersonen (fünf Wiederholungen pro Versuchsperson) dar. Die durchschnittlichen Größen der Standardfehler sind rechts oben abgebildet. Die Größe des Fehlerbalkens entspricht \pm einem Standardfehler des Mittelwertes. Rechts: Verhältnis der relativen Geschwindigkeiten bei 50% und 100% (rot) und 200% und 100% (grün).

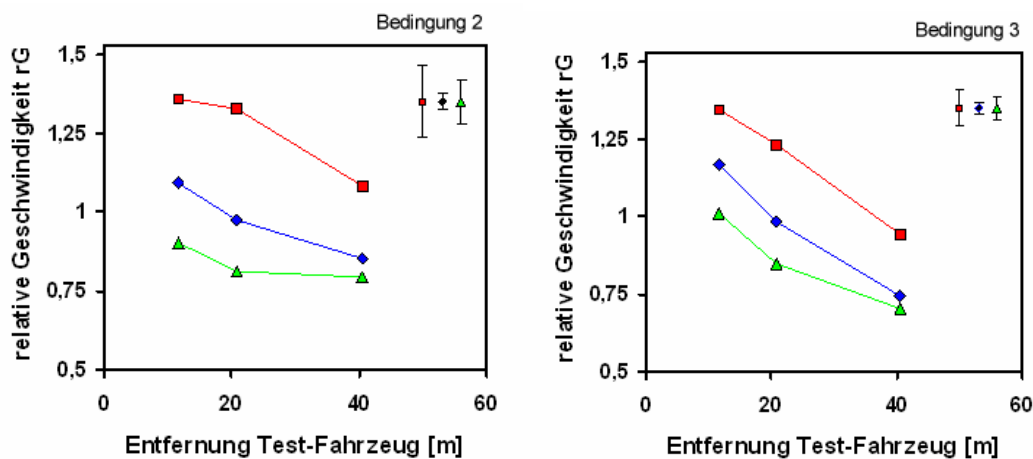


Abb. 44 Wie Abb. 43. Relative Geschwindigkeit in Bedingung 2 und Bedingung 3. In Bedingung 2 stellt jeder Datenpunkt den Mittelwert aus vier, in Bedingung 3 aus drei Versuchspersonen dar.

Die Größe der Fahrzeuge übt einen sehr starken Einfluss auf die Wahrnehmung ihrer Geschwindigkeit aus (Abb. 44, links). Ein kleines Test-Fahrzeug (50% Größe) wird als sich signifikant schneller bewegend wahrgenommen als ein Test-Fahrzeug normaler Größe ($p < 0.01$, zweiseitiger t-Test). Der Unterschied zwischen der relativen Geschwindigkeit für das große (200%) und das normal große (100%) Test-Fahrzeug ist zwar nicht signifikant ($p > 0.05$, zweiseitiger t-Test), aber die Tendenz ist eindeutig: Das große Fahrzeug wird als sich langsamer bewegend wahrgenommen. Interessant ist, dass die Datenpunkte für die drei Größen des Test-Fahrzeuges nahezu parallel verlaufen. Dieses Verhalten wird besonders deutlich, wenn man das Verhältnis der relativen

Geschwindigkeiten bei 50% und 100% Größe bzw. bei 200% und 100% Größe bildet (Abb. 44, rechts). In Bedingung 2 und 3 beobachten wir einen ähnlichen Einfluss der Größe der Fahrzeuge auf die Wahrnehmung ihrer objektiven Geschwindigkeit.

7.14.4 Diskussion

Eine Zunahme der Größe der Fahrzeuge führt zu einer Abnahme der Geschwindigkeit, mit welcher wir ihre Bewegung wahrnehmen und umgekehrt. Da die Linien, welche die relativen Geschwindigkeiten für eine bestimmte Größe des Fahrzeuges verbinden, fast parallel zueinander verlaufen, ist dieser Effekt unabhängig von der Entfernung der Fahrzeuge (Abb. 43, links, vgl. auch Abb. 43, rechts). Der Einfluss der Größe der Fahrzeuge hängt ferner nicht von den Umweltbedingungen bzw. von der simulierten Position des Betrachters ab (Bedingungen 2 & 3).

Hinsichtlich der Strategien, die das visuelle System bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit verwendet stehen uns mehrere Interpretationsmöglichkeiten offen. Die Größe des Fahrzeuges kann sich über die Wahrnehmung seiner Entfernung auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit auswirken. Sofern ein Fahrzeug größer ist als das Standard-Fahrzeug führt dies zu einem Unterschätzen seiner Entfernung. Bei gegebener Winkelgeschwindigkeit würde dies, wie in unseren Experimenten beobachtet, zu einem Unterschätzen der objektiven Geschwindigkeit des betreffenden Fahrzeuges führen (siehe auch Abschnitt 7.4.1.1). Allerdings sollte eine Verdopplung der Größe des Fahrzeuges zu einer Halbierung der wahrgenommenen Entfernung und somit zu einer Halbierung der objektiven Geschwindigkeit führen. Die beobachtete Reduktion der objektiven Geschwindigkeit ist aber weit geringer als vorher gesagt.

Die Größe des Fahrzeuges kann sich aber auch über die Bestimmung der zeitlichen Frequenz auf die Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit auswirken. Da $zF = v * rF$ ist (zF : zeitliche Frequenz; rF : Ortsfrequenz; v : Winkelgeschwindigkeit), sollte bei gleicher Winkelgeschwindigkeit eine Vergrößerung der Fahrzeuge zu einer Verringerung der räumlichen Frequenz rF und somit zu einer Abnahme der zeitlichen Frequenz führen. Eine Abnahme der zeitlichen Frequenz würde dann wiederum zu einer Abnahme der wahrgenommenen objektiven Geschwindigkeit des Fahrzeuges führen.

Eine alternative Interpretation für die Bestimmung der zeitlichen Frequenz gestaltet sich wie folgt. Der VW Käfer bzw. dessen Größe fungiert als Referenzrahmen zur Bestimmung seiner objektiven Geschwindigkeit. Der Beobachter bestimmt, um wie viele Vielfache seiner eigenen Länge sich das Fahrzeug in einem bestimmten Zeitraum fortbewegt. Bei gleicher Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeuges sollte eine Verdopplung der Länge des Fahrzeuges zu einer Halbierung des Faktors und somit zu einer Halbierung der zeitlichen Frequenz sowie der wahrgenommenen objektiven Geschwindigkeit führen. Bei zunehmender Größe der Fahrzeuge haben wir zwar eine Abnahme der

wahrgenommenen objektiven Geschwindigkeit festgestellt, jedoch konnten wir bei doppelter Größe des Fahrzeuges keine Halbierung der objektiven Geschwindigkeit feststellen. Die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit reduzierte sich nur auf ca. 75% (Abb. 43, rechts) und nicht 50% wie unter diesen Bedingungen zu erwarten gewesen wäre.

Weder die zeitliche Frequenz noch die Entfernungs-Hypothese können also im strengen Sinne für die beobachteten Ergebnisse aufkommen. Beide Hypothesen bieten eine korrekte Vorhersage über die Richtung, nicht aber über die Größe des Effektes. Wenn man annimmt, dass die Wahrnehmung des absoluten Wertes der zurückgelegten Strecke unabhängig von der Größe des Fahrzeuges ist, kann die Verwendung von Strategie 2 (Rock et al. Abb. 23, Geschwindigkeitskonstanz als Derivat der Größenkonstanz) bei Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit aller Wahrscheinlichkeit nach ausgeschlossen werden.

7.15 Der Einfluss von Vorwissen auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit

7.15.1 Einleitung

Beschränkt sich der Einfluss der Größe auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit auf räumlich-zeitliche Effekte oder spielt vielleicht auch der (bekannte) Fahrzeugtyp eine Rolle? Die Beobachtungen von Hershenson et al. (1999, siehe auch Abschnitt 7.4.1) lassen darauf schließen, dass dem Vorwissen über die Eigenschaften des bewegten Objekts eine entscheidende Bedeutung bei der Wahrnehmung seiner Geschwindigkeit zukommt. Um den Einfluss von Vorwissen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ beschreiben zu können, ließen wir die Versuchspersonen die Geschwindigkeit eines normal großen, eines übergroßen VW Käfers und eines Lkw vergleichen. Sofern Vorwissen in die Bestimmung der Geschwindigkeit einbezogen wird, sollte der Lkw mit der gleichen Geschwindigkeit wie der normal große VW Käfer wahrgenommen werden. Dagegen sollte der übergroße VW Käfer als sich wesentlich langsamer bewegend als der Lkw wahrgenommen werden.

7.15.2 Versuchsdurchführung

Beim Standard-Fahrzeug handelte es sich um einen VW Käfer normaler Größe, dessen Bewegung mit einer Geschwindigkeit von 3.0m/s in einer Beobachter-Fahrzeug Entfernung von 20.9m simuliert wurde. Den Einfluss von Vorwissen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit haben wir durch Verwenden von drei Typen von Test-Fahrzeugen untersucht.

- VW Käfer normaler Größe
- Übergroßer VW Käfer (ca. 280% Größe des VW Käfers normaler Größe)
- Lkw - der Lkw war genauso lang und hoch wie der übergroße VW Käfer, allerdings füllt der Lkw aufgrund seiner rechteckigen Form eine größere Fläche auf dem Bildschirm aus.

Jeder Test-Fahrzeugstyp kam in den Entfernungen 11.7, 20.9, 40.5m zur Darstellung. Acht

Versuchspersonen nahmen am Experiment teil. Jede Versuchsperson führte fünf Wiederholungen des Experimentes durch. Die Gesamtdauer des Experimentes betrug ca. 2.3 Stunden.

7.15.3 Ergebnis

Wie in allen vorangegangenen Experimenten sind die Versuchspersonen relativ gut in der Lage die objektiven Geschwindigkeiten des normal großen VW Käfers zu vergleichen (Abb. 45, rote Datenpunkte). Die objektive Geschwindigkeit des übergroßen VW Käfers wird, wie vorher gesagt, deutlich unterschätzt ($p < 0.01$, t-Test). Die Ergebnisse für die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit des Lkw erfüllen nur zum Teil die Vorhersagen. In einer Entfernung von 11.7m wird der Lkw als sich gleich schnell bewegend wie ein normal großer VW Käfer wahrgenommen. Dagegen wird die Geschwindigkeit des Lkw bei den beiden verbleibenden Entfernungen im Vergleich zu jener des normal großen VW Käfer deutlich unterschätzt ($p < 0.01$, t-Test). Allerdings wird der Lkw als sich wesentlich schneller bewegend als der übergroße VW Käfer wahrgenommen ($p < 0.01$, t-Test).

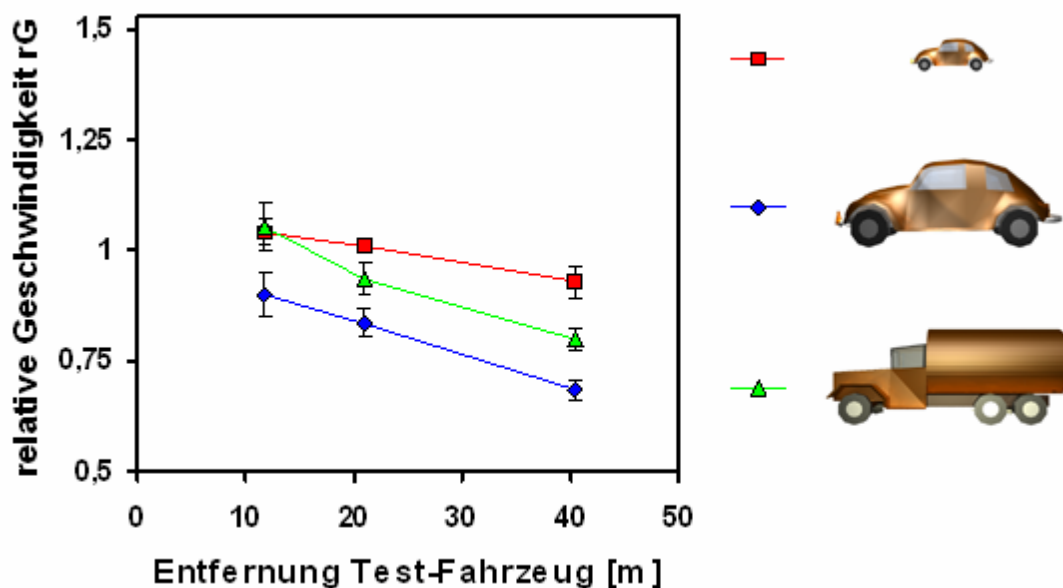


Abb. 45 Relative Geschwindigkeit rG in Abhängigkeit von der Entfernung und dem Typ des Test-Fahrzeuges. Die verwendeten Fahrzeugtypen sind auf der rechten Seite abgebildet (oben: normal großer VW-Käfer, Mitte: übergrosser VW-Käfer, unten: Lkw).

7.15.4 Diskussion

Unsere Ergebnisse weisen eindeutig auf die Verwendung von Vorwissen bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit hin. Zwar wurde unsere Vorhersage nur bei der kleinsten getesteten Entfernung komplett erfüllt - der Lkw wird dort mit der gleichen Geschwindigkeit wie der normal große VW Käfer wahrgenommen – aber bei jeder getesteten Entfernung wird der Lkw als sich schneller bewegend als der übergroße VW Käfer wahrgenommen. Somit ist uns der Nachweis

gelungen, dass es sich bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit nicht um ein rein räumlich-zeitliches Phänomen handelt, sondern dass auch „Top-Down-Effekte“ eine wichtige Rolle bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit spielen. Unsere Ergebnisse bestätigen somit die Beobachtungen von Hershenson et al. (1999), die bereits auf eine Verwendung von Vorwissen schließen ließen. Insgesamt gesehen ist das Verwenden von Vorwissen eine Komponente, die in früheren Studien ausnahmslos vernachlässigt wurde. Wir nehmen an, dass die bekannte Größe des Lkws im Vergleich zur „unbekannten“ Größe des übergroßen VW Käfers ausschlaggebend für den Unterschied in der wahrgenommenen Geschwindigkeit ist. Genauere Aussagen darüber, wie sich Vorwissen auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit auswirkt, d.h. ob es sich über die Wahrnehmung der Entfernung oder über eine Kalibration der relativen Weglänge auswirkt, lassen unsere Ergebnisse nicht zu.

7.16 Ausblick: Zusammenhang zwischen wahrgenommener Größe, Entfernung und Geschwindigkeit

7.16.1 Einleitung

Zwei Modelle zur Erklärung der Geschwindigkeitskonstanz („distance calibration“ und „extent mediation“, Epstein, 1978, siehe Abschnitt 7.3.8) schlagen vor, dass die wahrgenommene Entfernung eines Gegenstandes direkt oder indirekt in die Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit einbezogen wird. Des Weiteren haben sowohl wir als auch frühere Untersuchungen einen starken Einfluss der Größe von Objekten auf die wahrgenommene Geschwindigkeit beobachtet. Man muss sich folglich fragen: *„Wie stehen die Wahrnehmung von Größe, Entfernung und Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes bei der Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit in Zusammenhang?“* In einer etwas anderen Formulierung lautet die Frage: *„Fließen sogenannte Tiefen- oder Größenhinweise direkt oder indirekt via Größen- und Entfernungswahrnehmung in die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ein?“* Handelt es sich um eine Informationskette, bei der die wahrgenommene Entfernung auf der wahrgenommenen Größe und die wahrgenommene Geschwindigkeit wiederum auf der wahrgenommenen Entfernung basiert? Oder, sind die drei Wahrnehmungsleistungen unabhängig voneinander, d.h. sie verwenden zwar zu großen Teilen die gleichen Informationsquellen der Umwelt und, teilen sich bestimmte Ressourcen der Informationsverarbeitung, aber es handelt es sich letztendlich um drei eigenständige Prozesse. Die Ergebnisse Browns (1931), die Interpretation Wallachs (1939) sowie die Ergebnisse der Arbeiten von McKee et al. (1989) und Zohary et al. (1993) favorisieren eine Lösung, bei welcher relevante Informationen direkt und nicht via Wahrnehmung der Entfernung in die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit eingehen. Dagegen finden Rock et al. (1968), Epstein (1978) und Wist et al. (1976), dass der Betrachter zunächst die Entfernung der Gegenstände wahrnehmen muss, bevor er die objektive Geschwindigkeit des Gegenstandes bestimmen kann. Sowohl McKee et al. (1989) und

Zohary et al. (1993) führen ihren Nachweis für die Nicht-Verwendung der Entfernung durch eine gleichzeitige Bestimmung der Entfernung und der objektiven Geschwindigkeit. Kommt es zu Veränderungen der wahrgenommenen Entfernung, so müssten gleichzeitig entsprechende Veränderungen der wahrgenommenen Geschwindigkeit beobachtet werden, wenn man von einer Verwendung der wahrgenommenen Entfernung bei der Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit ausgeht. Da die Autoren in beiden Fällen keinen solchen Zusammenhang finden, schließen sie hieraus, dass die wahrgenommene Entfernung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit keine Rolle spielt.

Wir haben die Argumentation von McKee et al. (1989) und Zohary et al. (1993) aufgegriffen, mit dem Unterschied, dass die Versuchspersonen in unserem Experiment Entfernung, Geschwindigkeit und Größe der Test-Fahrzeuge bestimmen mussten. Besteht eine eindeutige Beziehung zwischen Geschwindigkeits- und Entfernungswahrnehmung, so sollte es möglich sein auf der Basis der Ergebnisse des Entfernungsexperimentes die wahrgenommene Geschwindigkeit vorherzusagen. Gleiches gilt für die Größenwahrnehmung. Wenn ein direkter Zusammenhang zwischen Größe und Geschwindigkeit besteht, sollte es möglich sein letztere durch die Ergebnisse des Größenexperimentes vorherzusagen.

7.16.2 Versuchsdurchführung

Die Durchführung des Experimentes erfolgte in drei getrennten Blöcken. Im ersten Block mussten die Versuchspersonen die Geschwindigkeit, im zweiten Block die Größe und im dritten Block schließlich die Entfernung der Fahrzeuge vergleichen. Die einzelnen Blöcke unterteilten sich noch einmal in vier Versuchsbedingungen, die bereits als Bedingungen 1, 5, 6 und 7 im Experiment zur Untersuchung des Einflusses von Tiefenhinweisen Anwendung fanden (siehe Abschnitt 7.13). Im einzelnen handelte es sich dabei um folgende Versuchsbedingungen:

- Bedingung 1: Standard-Bedingung
- Bedingung 2: wie Bedingung 1, jedoch stereoskopische Präsentation
- Bedingung 3: wie Bedingung 1, jedoch mit einer simulierten Bewegung des Betrachters
- Bedingung 4: wie Bedingung 2, jedoch mit stereoskopischer Präsentation und einer simulierten Bewegung des Betrachters

7.16.2.1 Vergleich der Geschwindigkeit

Vier Versuchspersonen nahmen am Experiment teil. Drei der Versuchspersonen hatten bereits an dem Experiment zur Untersuchung des Einflusses von Tiefenhinweisen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit teilgenommen. Ihre Geschwindigkeits-Daten konnten somit aus diesem Experiment übernommen werden. Die vierte Versuchsperson führte je fünf Wiederholungen der vier zuvor beschriebenen Versuchsbedingungen durch.

7.16.2.2 Gemeinsamkeiten des Vergleichs der Größe und der Entfernung

In der Größen- und der Entfernungsaufgabe bewegten sich die simulierten Standard- und Test-Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von 3.0m/s. Das Standard-Fahrzeug wurde in einer Entfernung von 20.9m simuliert. Um die Erkennung des Test-Fahrzeuges zu erleichtern wurde seine Stossstange gelb eingefärbt, während die Stossstange des Standard-Fahrzeuges weiß war. Um zu vermeiden, dass die Versuchspersonen die Entfernungsinformation der Straßen verwenden, wurden diese aus der Szene entfernt. Die Grundfläche bestand demnach aus einer einzigen großen Wiese. Da die Versuchspersonen noch nicht mit der Größen- und der Entfernungsaufgabe vertraut waren, wurden jeweils zwei Versuchsblöcke von ca. 20 Minuten Dauer zur Eingewöhnung durchgeführt.

7.16.2.3 Vergleich der Größe

Nach der gleichzeitigen Präsentation von zwei Fahrzeugen mussten die Versuchspersonen entscheiden, ob das Test-Fahrzeug kleiner oder größer als das Standard-Fahrzeug war. Die Größe der Test-Fahrzeuge wurde im Verlauf des Experimentes durch Verwendung der gleichen adaptiven Schwellenmethode bestimmt, die schon beim Vergleich der Geschwindigkeiten Anwendung fand. Genau wie in den Geschwindigkeitsexperimenten untersuchten wir den Größenvergleich durch Präsentation der Test-Fahrzeuge in drei Entfernungen (11.7, 20.9 and 40.5m). Alle vier Versuchspersonen wiederholten das Experiment dreimal. Bei jeder getesteten Entfernung des Test-Fahrzeuges haben wir zwei unterschiedliche „Start-Größen“ des Test-Fahrzeuges verwendet (75% und 125% der Größe des Standard-Fahrzeuges).

7.16.2.4 Vergleich der Entfernung

Der Vergleich der Entfernungen der Fahrzeuge gliederte sich in drei Blöcke. In jedem Block war eine vordefinierte Entfernung des Test-Fahrzeuges als Referenzwert definiert (Abb. 46). Bei den Referenzwerten handelt es sich um die halbe Entfernung, die gleiche Entfernung und die doppelte Entfernung des Standard-Fahrzeuges. Der jeweilige Referenzwert wurde zu Beginn eines Blockes angezeigt.

In der Bedingung „halbe Entfernung“ mussten die Versuchspersonen entscheiden, ob sich das Test-Fahrzeug in einer Entfernung befand, die kleiner oder größer als die halbe Entfernung des Standard-Fahrzeuges war (Abb. 46, links). Da das Standard-Fahrzeug in einer Entfernung von 20.9m simuliert wurde, mussten die Versuchspersonen entscheiden, ob das Test-Fahrzeug weiter als 10.45m entfernt war. In der Bedingung „gleiche Entfernung“ mussten die Versuchspersonen entscheiden, ob das Test-Fahrzeug in einer größeren Entfernung als das Standard-Fahrzeug dargestellt wurde (Abb. 46, Mitte). Entsprechend galt es für die Versuchspersonen in der Bedingung „doppelte Entfernung“ zu entscheiden, ob das Test-Fahrzeug weiter entfernt war als die doppelte Entfernung des Standard-Fahrzeuges (41.8m, Abb. 46, rechts).

Wahrnehmung in Virtuellen Welten

In jedem Block haben wir zwei unterschiedliche „Start-Entfernungen“ des Test-Fahrzeuges verwendet (7.8 und 20.9m bei halber Entfernung, 11.7 und 30.6m bei gleicher Entfernung, 20.9 und 60.3m bei doppelter Entfernung). Jede Versuchsperson führte zwei Wiederholungen eines jeden Versuchsblocks durch.

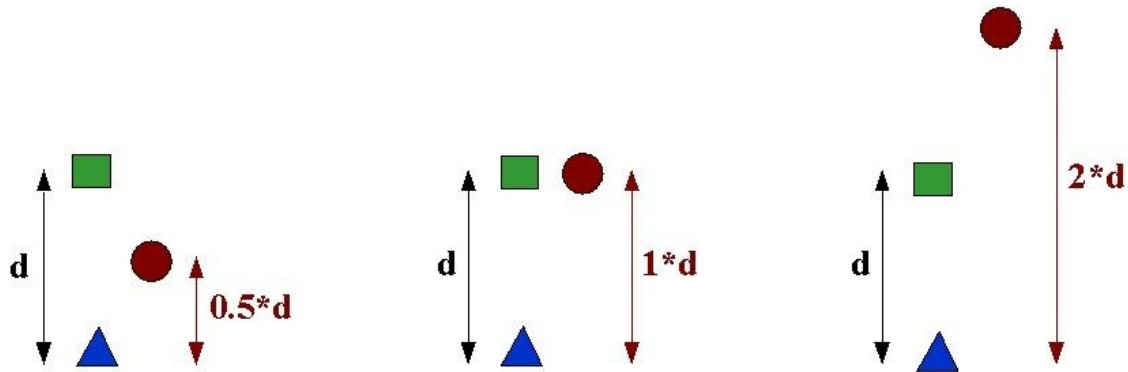


Abb. 46 Schematische Darstellung der drei Versuchsblöcke beim Vergleich der Entfernungen. In allen drei Teilabbildungen steht das blaue Dreieck stellvertretend für die Position des Betrachters, während das grüne Rechteck die Entfernung des Standard-Fahrzeuges (20.9m) darstellt. Der rote Kreis spiegelt den Referenzwert der Position und Entfernung des Test-Fahrzeuges wider. Der linke Teil der Abbildung zeigt die Konstellation für den Richtwert „halbe Entfernung“, der mittlere Teil für „gleiche Entfernung“, der rechte Teil für „doppelte Entfernung des Standard-Fahrzeuges“ (siehe Text).

7.16.3 Ergebnis

7.16.3.1 Berechnungen der relativen Größe und Entfernung

Ähnlich wie in den Geschwindigkeitsexperimenten haben wir in den Größen- und Entfernungsexperimenten die relative Größe bzw. die relative Entfernung am PSG bestimmt. Die relative Größe des Test-Fahrzeuges am PSG berechnet sich wie folgt:

$$\text{relative Größe} = \frac{\text{Größe des Standard-Fahrzeuges (=100\%)}}{\text{Größe des Test-Fahrzeuges am PSG}}$$

Hat die relative Größe einen Wert von größer als „1“, dann haben die Versuchspersonen die Größe des betreffenden Test-Fahrzeuges überschätzt und umgekehrt.

Die Berechnung der relativen Entfernung erfordert je nach Versuchsblock das Verwenden unterschiedlicher Referenzentfernungen. Generell berechnet sich die relative Entfernung zu:

$$\text{relative Entfernung} = \frac{\text{Richtwert der Entfernung}}{\text{Entfernung des Test-Fahrzeuges am PSG}}$$

Der Richtwert der Entfernung beträgt in der Bedingung „halbe Entfernung“ 10.45m, in der Bedingung „gleiche Entfernung“ 20.9m und in der Bedingung „doppelte Entfernung“ 41.8m. Ist der Wert der relativen Entfernung kleiner als „1“, so haben die Versuchspersonen die Entfernung des Test-Fahrzeuges unterschätzt und umgekehrt. Beträgt der Wert der relativen Entfernung genau „1“, so haben die Versuchspersonen das Test-Fahrzeug exakt in die „Richtwert-Entfernung“ gesetzt.

7.16.3.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Größen, Geschwindigkeits- und Entfernungsbestimmungen sind in Abb. 47 dargestellt. Da sich die Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen zum Teil erheblich unterscheiden, haben wir auf eine Bildung des Mittelwertes über alle Versuchspersonen verzichtet.

7.16.3.3 Ergebnis des Geschwindigkeitsvergleichs

Die Ergebnisse des Vergleichs der Geschwindigkeiten sind in der unteren Reihe von Abb. 47 dargestellt. Während die Versuchsperson V3 unabhängig von der Versuchsbedingung einen hohen Grad an Geschwindigkeitskonstanz zeigt, überschätzen die Versuchspersonen V1 & V2 die Geschwindigkeit des nahen (11.7m) und unterschätzen die Geschwindigkeit des fernen Fahrzeuges (40.5m). Bei beiden Versuchspersonen zeigt sich in Versuchsbedingung V4 (alle Tiefenhinweise) eine deutliche Zunahme der Geschwindigkeitskonstanz. Die Ergebnisse der vierten Versuchsperson V4 zeigen ein unerwartetes Muster. Diese Versuchsperson überschätzte die Geschwindigkeit ferner und unterschätzte die Geschwindigkeit naher Fahrzeuge.

7.16.3.4 Ergebnis des Entfernungsvergleichs

Die Ergebnisse der Entfernungsangabe zeigen kein einheitliches Muster (Abb. 47, obere Reihe). Während die Versuchspersonen V1, V3 & V4 die Entfernung des Test-Fahrzeuges in der Bedingung „halbe Entfernung“ unterschätzen, überschätzt die Versuchsperson V2 diese Entfernung. In der Bedingung „gleiche Entfernung“ ist die Genauigkeit der Entfernungsschätzungen aller Versuchspersonen vergleichsweise hoch. In der Bedingung „doppelte Entfernung“ unterschätzen die Versuchspersonen V2 bis V4 die Entfernung des Test-Fahrzeuges, während Versuchsperson V1 die Entfernung überschätzt. Unterschätzen bedeutet hier, dass beispielsweise ein in 40.5m Entfernung präsentiertes Fahrzeug als weniger weit entfernt wahrgenommen wird.

Wenn wir annehmen, dass das Wissen über die Entfernung des Fahrzeuges in die Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit einbezogen wird, dann sollten wir in der Lage sein aufgrund der Entfernungsschätzungen der Versuchspersonen die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit vorher zu sagen. Um diese Vorhersage treffen zu können, müssen wir voraus setzen, dass die Versuchspersonen die Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge korrekt einschätzen. Ist diese Voraussetzungen erfüllt, berechnet sich die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit zu:

$$\text{objektive Geschwindigkeit} = \tan\left(\frac{\text{Winkelgeschwindigkeit}}{\text{Zeitdauer}}\right) * \text{wahrgenommene Entfernung}$$

Die wahrgenommene Entfernung entspricht der Entfernung des Test-Fahrzeuges am PSG. Da wir uns für die Geschwindigkeitskonstanz interessieren, ziehen wir jene Winkelgeschwindigkeiten zur Berechnung heran, die beim Vorliegen von perfekter Geschwindigkeitskonstanz zu beobachten wären (Tabelle 4). Bei Anwendung des beschriebenen Verfahrens zur Vorhersage der objektiven

Wahrnehmung in Virtuellen Welten

Geschwindigkeit ergeben sich Zusammenhänge nach folgendem Muster. Falls in der Bedingung „halbe Entfernung“ der Wert der Entfernung des Test-Fahrzeuges am PSG auf ein Unterschätzen der betreffenden Entfernung hinweist, führt dies automatisch zu einem Unterschätzen der objektiven Geschwindigkeit.

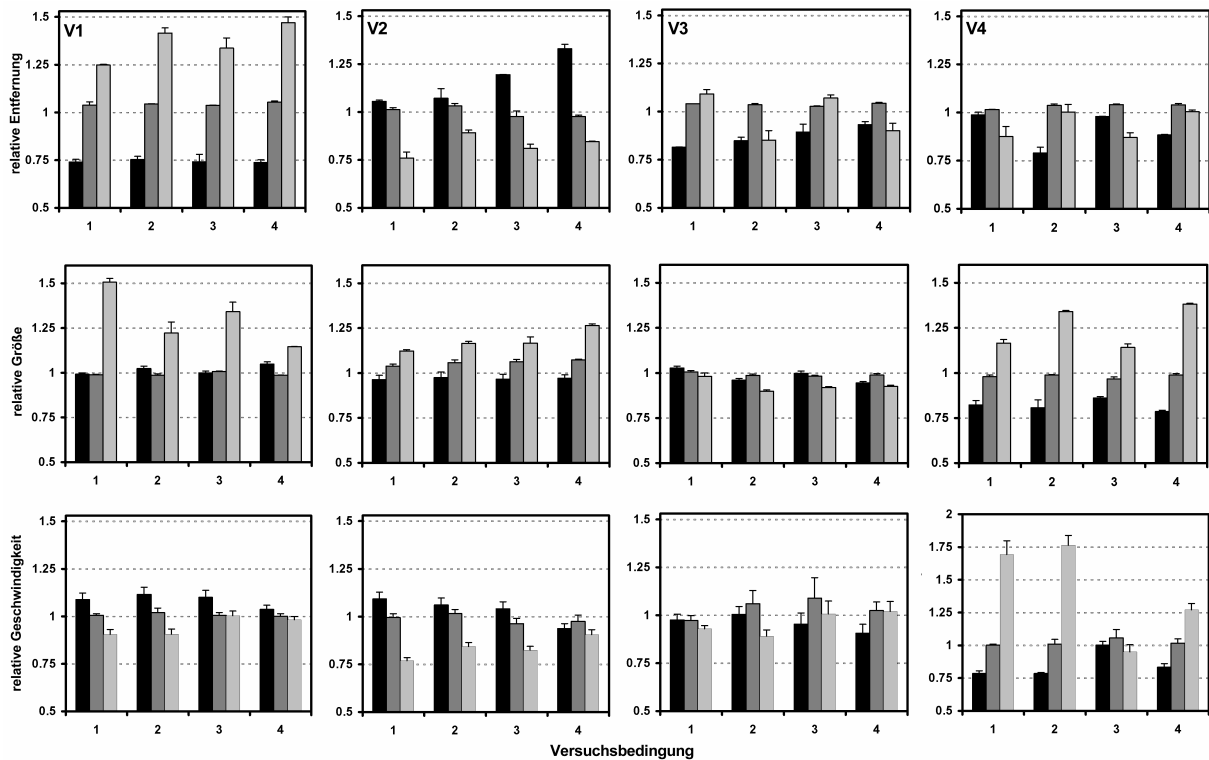


Abb. 47 Die Graphen zeigen die Werte der relativen Geschwindigkeit, der relativen Größe und der relativen Entfernung des Test-Fahrzeuges am PSG in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung. Die erste Reihe der Graphen zeigt die Ergebnisse der Entfernungsschätzungen, die zweite Reihe die Ergebnisse der Größenschätzungen und die dritte Reihe die Ergebnisse des Geschwindigkeitsexperimentes. Die Ergebnisse einer jeden Versuchsperson (V1-V4) sind jeweils in einer Spalte angeordnet. Entfernungsaufgabe: Die schwarzen Balken stellen die Ergebnisse für die Bedingung „halbe Entfernung“, die mittelgrauen Balken für die Bedingung „gleiche Entfernung“ und die hellgrauen Balken für die Bedingung „doppelte Entfernung“ dar. Jeder Balken entspricht dem Mittelwert von zwei Wiederholungen des Experimentes. Größen- und Geschwindigkeitsaufgabe: Die schwarzen Balken zeigen die Werte der relativen Größe bzw. der relativen Geschwindigkeit für eine Entfernung des Test-Fahrzeuges von 11.7m, die mittelgrauen Balken für eine Entfernung von 20.9m und die hellgrauen Balken für eine simulierte Entfernung des Test-Fahrzeuges von 40.5m. In der Größenaufgabe stellt jeder Wert den Mittelwert aus drei Wiederholungen, in der Geschwindigkeitsaufgabe aus 4 Wiederholungen dar. Es ist zu beachten, dass die y-Achse im Fall von Versuchsperson 4 (V4) eine andere Skalierung aufweist. Die Größe eines jeden Fehlerbalkens entspricht einen Standardfehler des Mittelwertes.

Die so vorausgesagten Werte für die objektive Geschwindigkeit können dann anschließend, wie in Abschnitt 7.8.1.1 und 7.8.1.2 beschrieben wurde, in relative Geschwindigkeiten und einen Wert für den Geschwindigkeitskonstanzfaktor umgewandelt werden. Die Werte für den vorausgesagten Geschwindigkeitskonstanzfaktor sind in Abb. 48 (schwarze Balken) dargestellt. Ein Vergleich mit dem tatsächlich gemessenen Wert des Geschwindigkeitskonstanzfaktors (Abb. 48, hellgraue Balken)

ergibt für die vier Versuchspersonen z.T. recht unterschiedliche Ergebnisse. Während wir bei Versuchsperson V3 einen guten Zusammenhang zwischen dem vorhergesagten und dem tatsächlichen Wert des Geschwindigkeitskonstanzfaktors finden, konnten wir bei den Versuchspersonen V1 & V2 keinen solchen Zusammenhang herstellen. Die Ergebnisse von Versuchsperson V4 sind uneinheitlich. Während in den ersten beiden Bedingungen kein Zusammenhang zu erkennen ist, besteht in den Bedingungen 3 & 4 ein klarer Zusammenhang zwischen dem vorhergesagten und dem tatsächlichen Wert des Geschwindigkeitskonstanzfaktors.

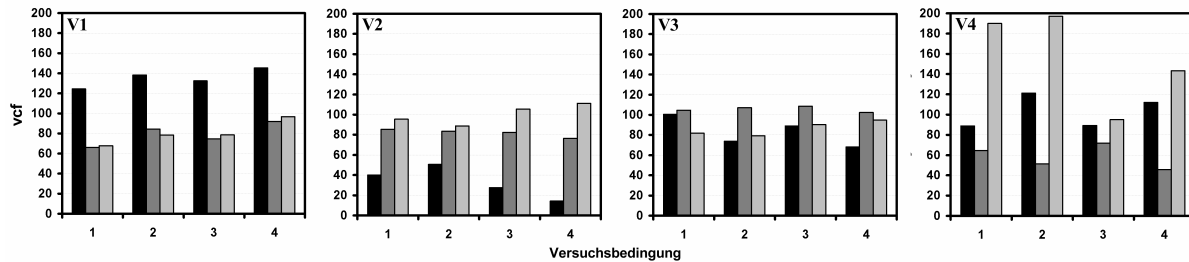


Abb. 48 Vergleich der Werte des Geschwindigkeitskonstanzfaktors vcf in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung. Jeder Graph stellt die Ergebnisse bzw. Vorhersagen von vcf für eine Versuchsperson dar. Schwarze Balken: Werte von vcf , die auf der Basis der Ergebnisse der Entfernungsaufgabe vorhergesagt wurden. Mittelgraue Balken: Werte von vcf , die auf der Basis der Ergebnisse der Größenaufgabe vorhergesagt wurden. Hellgraue Balken: Tatsächlich gemessene Werte von vcf .

7.16.3.5 Ergebnis des Größenvergleichs

Die Ergebnisse des Größenvergleichs sind in der mittleren Reihe von Abb. 47 dargestellt. Alle Versuchspersonen sind in der Lage die Größe der beiden Fahrzeuge als gleich zu erkennen, wenn sich Standard- und Test-Fahrzeug in der gleichen Entfernung befinden. Wenn das Test-Fahrzeug in einer Entfernung von 11.7m präsentiert wird, hat die relative Größe des Test-Fahrzeuges bei den Versuchspersonen V1-V3 den Wert „1“, während die Versuchsperson V4 die Größe des Test-Fahrzeuges bei dieser Entfernung unterschätzte. Mit Ausnahme von Versuchsperson V3 überschätzen alle Versuchspersonen die Größe des Test-Fahrzeuges, wenn es in einer Entfernung von 40.5m präsentiert wurde.

Genau wie im Fall der Entfernungsschätzungen können auch die Größenschätzungen verwendet werden, um die wahrgenommene objektive Geschwindigkeit der Test-Fahrzeuge vorherzusagen. Dabei nehmen wir erneut an, dass die Versuchspersonen bei allen Entfernungen der Test-Fahrzeuge in der Lage sind die Winkelgeschwindigkeit der Fahrzeuge korrekt einzuschätzen. Ferner nehmen wir an, dass die Einschätzung der Größe in einer invers linearen Transformation in die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit einfließt. Hierbei gehen wir von einer Strategie des visuellen Systems aus, welche die Zahl der Vielfachen der Fahrzeuglänge bestimmt um welche sich das Fahrzeug in einem bestimmten Zeitraum fortbewegt hat. Ein Überschätzen der Größe des Fahrzeuges führt somit zu einem Unterschätzen der Geschwindigkeit. Die bei den unterschiedlichen Entfernungen

vorhergesagten objektiven Geschwindigkeiten fließen schließlich in die Berechnung des Geschwindigkeitsfaktors v_{cf} ein. Der Vergleich der vorhergesagten und der tatsächlich beobachteten Werte von v_{cf} (Abb. 48) zeigt für die Versuchspersonen V1-V3 eine gute Korrelation zwischen den Vorhersagen und dem beobachteten Verhalten. Dagegen ist die Korrelation bei Versuchsperson V4 minimal.

7.16.4 Diskussion

In diesem Experiment haben wir versucht, auf der Basis einer parallelen Bestimmung der Wahrnehmung der Größe, der Entfernung und der Geschwindigkeit Aussagen über mögliche Zusammenhänge zwischen Größen-, Entfernungs- und Geschwindigkeitswahrnehmung zu machen. Die Ergebnisse deuten an, dass zwischen der Wahrnehmung der Größe und der Geschwindigkeit ein engerer Zusammenhang besteht als zwischen wahrgenommener Entfernung und Geschwindigkeit. Hieraus aber zu schließen, dass die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit eines bewegten Gegenstandes auf der Wahrnehmung seiner Größe aufbaut, wäre verfrüht. Bestätigt wird jedoch erneut der äußerst starke Einfluss der Größeninformation auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit.

Wie zuvor erwähnt wurde, wäre es verfrüht von unseren Ergebnissen auf einen direkten Zusammenhang zwischen Wahrnehmung der Größe und Geschwindigkeit zu schließen. Verfrüht deshalb, weil die Zahl der Versuchspersonen zu gering und die Variabilität der Daten der Versuchspersonen zu hoch ist. Trotzdem haben wir uns entschlossen das vorliegende Experiment nicht weiter zu verfolgen, da der experimentelle Ansatz gewisse Risiken birgt. Aufgrund dieser Risiken sehen wir den verhältnismäßig großen Aufwand an Zeit und Zahl der Versuchspersonen als nicht gerechtfertigt an. Welche Risiken birgt nun der experimentelle Ansatz?

Sowohl in unserem Experiment als auch in den Experimenten von McKee et al. (1989) und Zohary et al. (1993) wurden Entfernung und Geschwindigkeit in unterschiedlichen Versuchsblöcken und teilweise unter Verwendung unterschiedlicher Methoden bestimmt. Unserer Meinung nach ist es nicht möglich von diesen Ergebnissen auf eine Beteiligung der Entfernungs- oder auch der Größenwahrnehmung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit zu schließen. Bei der Bestimmung der wahrgenommenen Entfernung werden die Versuchspersonen explizit nach der Entfernung gefragt. Hinsichtlich der Informationsverarbeitung bedeutet dies, dass die „vollständige Verarbeitungskette für Entfernungswahrnehmung“ durchlaufen wird. Dabei werden sicherlich auch „entfernungsspezifische“ kognitive Effekte (Vorwissen), die charakteristisch für das Wahrnehmen von Entfernungen sind, zum Tragen kommen. Dagegen ist das Ziel beim Bestimmen der objektiven Geschwindigkeit ein völlig anderes. Die Informationsverarbeitung wird sich hier spezifisch auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit und nicht auf die Wahrnehmung der Entfernung konzentrieren. Sofern man die Zusammenhänge zwischen Entfernungs-, Größen- und

Geschwindigkeitswahrnehmung unter Verwendung des vorliegenden experimentellen Designs erforschen möchte, sollte die Bestimmung der drei Maße innerhalb eines experimentellen Blockes, am Besten innerhalb eines jeden Versuchsdurchganges erfolgen. Des weiteren sollte die Wahrnehmung der Geschwindigkeit direkt abgefragt werden, während man auf die Wahrnehmung der Entfernung und Größe indirekt, d.h. ohne Wissen der Versuchsperson zugreifen müsste. Die Entwicklung eines Experimentes, welches diese Anforderungen erfüllt, gestaltet sich jedoch als äußerst schwierig.

Wir haben das vorliegende Experiment trotz der zuvor geäußerten Bedenken in die Arbeit aufgenommen, da wir überzeugt sind, dass die grundlegende Idee dieses Experimentes in Zukunft sicherlich einen Weg bieten wird, den Zusammenhang zwischen Entfernungs-, Größen- und Geschwindigkeitswahrnehmung herzustellen.

7.17 Zusammenfassung der Experimente

Die Untersuchung der Geschwindigkeitskonstanz unter realistischeren Bedingungen stellt einen entscheidenden Aspekt unserer Arbeit dar. Zu Beginn dieses Kapitels hatten wir, basierend auf den Beobachtungen von Hershenson et al. (1999) die Vermutung geäußert, dass der Verwendung von Vorwissen eine besondere Bedeutung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit von sich bewegenden Gegenständen zukommt.

Alle früheren Untersuchungen zur Geschwindigkeitskonstanz wurden unter Verwendung einfacher Reizmuster (Punkte, Linien) durchgeführt, die zudem vor einem einfachen, zumeist einfarbigen Hintergrund präsentiert wurden. Eine Verwendung von Vorwissen zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit ist somit unter den Bedingungen der früheren Experimente unwahrscheinlich.

Die Verwendung einfacher Reizmuster in früheren Arbeiten war zum Teil durch Beschränkungen der verfügbaren experimentellen Methoden und Möglichkeiten bedingt. Im Gegensatz hierzu war es uns mit Hilfe virtueller Welten möglich, Geschwindigkeitskonstanz unter realistisch erscheinenden Bedingungen zu untersuchen.

Aufgrund der ungleich komplexeren Versuchsbedingungen war es jedoch zunächst notwendig zu klären, welche Informationen aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Informationen unter den Bedingungen unserer Experimente einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit haben.

Die Ergebnisse unseres ersten Experimentes zeigen, dass die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit auch unter realistisch erscheinenden Bedingungen ähnlichen Gesetzmäßigkeiten folgt wie unter den vereinfachten Laborbedingungen früherer Untersuchungen (Abschnitt 7.10). Auch wir konnten keine perfekte Geschwindigkeitskonstanz beobachten, d.h. die Versuchspersonen schätzen beim Vergleich der objektiven Geschwindigkeit von zwei Gegenständen bei gleicher Geschwindigkeit die Geschwindigkeit des weiter entfernten Objekts als geringer ein.

In einer Reihe von Experimenten, in deren Verlauf wir unterschiedlichste Eigenschaften der Versuchsbedingungen und der simulierten Umwelt verändert haben, konnten wir zeigen, dass es sich bei der Geschwindigkeitskonstanz um eine sehr robuste Wahrnehmungsleistung handelt. Viele Aspekte der Szene können verändert werden, ohne dass es dabei zu signifikanten Änderungen der Geschwindigkeitskonstanz kommt (Abschnitt 7.11).

Durch die Verwendung virtueller Welten zur Durchführung der Experimente war es uns erstmals möglich, den Einfluss einer Reihe von Tiefenhinweisen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit individuell oder in Kombination zu untersuchen (Abschnitt 7.13). Die Ergebnisse lassen drei wichtige Schlussfolgerungen zu.

1. Die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ist relativ robust gegen zum Teil erhebliche Änderungen der Szene (z.B. Entfernen der Grundfläche).
2. Bei der Untersuchung des Einflusses von Disparitäts- und Parallaxeninformation stellte sich heraus, dass der Einfluss der Kombination der Informationen größer ist als wir aufgrund der Summe der Einzeleffekte vorhergesagt hätten (Johnson et al., 1994).
3. Die Größe eines Objektes hat den mit Abstand stärksten Einfluss auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit.

Der dominante Einfluss der Größe bestätigt die Ergebnisse früherer Untersuchungen (Brown, 1931; Epstein, Cody, 1980; Zohary, Sittig, 1993). Wir haben dies zum Anlass genommen, den Einfluss der Größe in zusätzlichen Experimenten genauer zu untersuchen (Abschnitt 7.14 und 7.15). Dabei zeigt sich, dass unser simuliertes Fahrzeug unabhängig von der Entfernung umso langsamer wahrgenommen wird je größer es ist. Es offenbarte sich des Weiteren ein starker Einfluss des Vorwissens über den Zusammenhang zwischen Größe, Entfernung und Geschwindigkeit eines Objektes auf die Wahrnehmung seiner objektiven Geschwindigkeit. Ein Lkw wird als sich schneller bewegend wahrgenommen als ein VW Käfer, der die gleiche Größe wie der Lkw hatte. Aufgrund dieser Ergebnisse können wir folgern, dass der Verwendung von Vorwissen bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit eine entscheidende Bedeutung zukommt.

An diesem Punkt grenzen sich die Überlegungen unserer Arbeit eindeutig von jenen früherer Arbeiten ab. Während frühere Modelle die Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit durchwegs mit „Bottom-Up-Strategien“ beschrieben haben, spielt in unseren Überlegungen der „Top-Down-Effekt“ eine wichtige Rolle. Vorwissen über unsere Umwelt kommt nicht nur im Fall des Lkw zur Geltung, sondern der dominante Einfluss der Größe auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit zeigt die Verwendung von Vorwissen in einem anderen Zusammenhang auf. Durch Erfahrung haben wir gelernt, dass die Größe von Objekten einen sehr zuverlässigen und wichtigen Hinweis bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit darstellt. Aus diesem Grund kann sich das visuelle System beim

Bestimmen der objektiven Geschwindigkeit gezielt auf die Auswertung der Größeninformation konzentrieren. Eine derart selektive Verarbeitung von Informationen ermöglicht eine einfachere, effizientere und ökonomischere.

Die Ergebnisse des Experimentes zur Untersuchung des Einflusses der Tiefenhinweise haben uns gezeigt, dass sich eine Vielzahl von Faktoren auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit auswirkt. Allerdings hat kein Faktor auch nur annähernd den gleichen Einfluss wie die Objektgröße. Die Ergebnisse des Größenexperimentes (Abschnitt 7.14) lassen ferner darauf schließen, dass eine Verwendung der zurückgelegten Distanz (in Metern) zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit unwahrscheinlich ist. Durch den Wegfall dieser Möglichkeit verbleiben nur noch jene Strategien des visuellen Systems zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit, die eine Kombination der Winkelgeschwindigkeit mit anderen Informationen erfordern. Theoretische Überlegungen (Smith, Edgar, 1984; Adelson, Bergen, 1985; van Santen, Sperling, 1985; Watson, Ahumada, 1985) weisen darauf hin, dass die Verarbeitung der Winkelgeschwindigkeit in einer sehr frühen Stufe der Informationsverarbeitung erfolgt. Unter der Annahme, dass die Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit eine Voraussetzung für die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ist sowie unter Berücksichtigung der Verwendung von Vorwissen deutet alles darauf hin, dass die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit eine kollektive Zusammenarbeit unterschiedlicher Verarbeitungsstufen voraussetzt. Dies bedeutet aber auch, der Informationsfluss erfolgt nicht mehr, wie in früheren Modellen von „unten nach oben“, sondern es handelt sich im weitesten Sinne um zirkulierende Informationsflüsse in deren Zusammenhang sich Informationen unterschiedlichster Verarbeitungsstufen zu jedem Zeitpunkt gegenseitig beeinflussen (dynamisches Gleichgewicht).

Inwieweit können die in früheren Arbeiten vorgeschlagenen Strategien des visuellen Systems (Abschnitt 7.3.8) verwendet werden, um Geschwindigkeitskonstanz in einer realistischer erscheinenden Umwelt zu erklären?

In den meisten früheren Untersuchungen war der Referenzrahmen (Apertur) so gestaltet, dass die Ergebnisse dieser Untersuchungen fast zwangsläufig zu einer Theorie führen mussten, die den Rahmen als zentrales Element beinhaltet. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es sich bei Wallachs Relations-Hypothese um die Interpretation eines Artefaktes handelt. Beim Vergleich objektiver Geschwindigkeiten stellt sie nach wie vor die Geeignetesten aller vorgeschlagenen Strategien dar. Allerdings muss man fragen, welche Struktur unter ökologisch relevanten Bedingungen als Referenzrahmen fungiert. Denkbar ist zum einen, dass die das bewegende Objekt flankierenden statischen Elemente einer Szene den Referenzrahmen bilden. Zum anderen kann man sich aber auch vorstellen, dass das Objekt selbst als Referenzrahmen dient. Unter diesen Bedingungen bestimmt der Betrachter um wie viele Vielfache seiner eigenen Länge sich das Objekt in einem bestimmten Zeitraum bewegt hat. Zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit benötigt der Betrachter dann noch die Kenntnis der Länge des Objektes. Indirekt kann der Betrachter so auch die zurückgelegte

Wegstrecke bestimmen. Die Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit setzt in diesem Fall jedoch nicht die explizite Kenntnis der zurückgelegten Wegstrecke voraus.

Smith et al. (1958) hatten in ihren Experimenten auf die Möglichkeiten hingewiesen, dass die Probanden Browns (1931) die zeitliche Frequenz bestimmt haben mit welcher die Punkte den Referenzrahmen passiert haben. Es bedarf nur eines kleinen Schrittes, um die Relations-Hypothese und die Befunde von Smith et al. in ein gemeinsames Bild einzupassen. Auch bei Wallach geht es letztendlich um die Bestimmung der zeitlichen Frequenz. Der Rahmen der Versuchsanordnung bietet letztendlich nur das Medium um die zeitliche Frequenz bestimmen zu können. Wie wir in der Diskussion zu unserem Größenexperiment ausgeführt haben, lässt sich auch der Einfluss der Objektgröße auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit durch die Beziehung *zeitliche Frequenz = Winkelgeschwindigkeit * Ortsfrequenz* erklären. Somit stellt die Bestimmung dieser speziellen Form der zeitlichen Frequenz sicherlich eine attraktive Hypothese zur Bestimmung der objektiven Geschwindigkeit dar. Eine Kombination aus zeitlicher Frequenz und skalierten Weglänge (=Skalierung der Vielfachen) wurde zuletzt auch von McKee et al. (1997) vorgeschlagen.

Beim Vergleich von Geschwindigkeiten stellt die Verwendung der zeitlichen Frequenz sicherlich die attraktivste Lösung dar. Was geschieht aber, wenn nur ein Objekt zur Verfügung steht? Die zeitliche Frequenz des Objektes muss dann in eine objektive Geschwindigkeit umgesetzt werden. Wie dies erfolgt ist nicht bekannt. Eine eventuelle Bedeutung der Wahrnehmung der Entfernung, wie von mehreren Autoren vorgeschlagen (Rock et al., 1968; Wist et al. 1976; Epstein, 1978), kann hier nicht ausgeschlossen werden. Den von McKee et al. (1989) und Zohary et al. (1993) geführten Nachweis einer Nicht-Beteiligung der Entfernung auf der Basis einer getrennten Messung von Geschwindigkeit und Entfernung sehen wir als kritisch an. Wahrgenommene Entfernung ist nicht gleich wahrgenommene Entfernung. Wir erwarten gewisse Unterschiede in der Informationsverarbeitung, wenn in einer Bedingung die Wahrnehmung der Entfernung, in der anderen Bedingung die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit die primäre Aufgabe der Probanden ist.

Einen Schwachpunkt vieler Experimente stellt die Tatsache dar, dass sich die Objekte ausnahmslos senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters bewegt haben. Unter diesen Bedingungen stellen die Relations- und Entfernungshypothese die geradlinigsten und einfachsten Interpretationen der Ergebnisse dar. Objekte der realen Welt können sich jedoch in alle beliebigen Richtungen bewegen. Dabei ändert sich die Entfernung zwischen Betrachter und Objekt kontinuierlich. Unter diesen Bedingungen spielt die Wahrnehmung der zurückgelegten Strecke vielleicht doch wieder eine Rolle. Oder, sind in diesem Zusammenhang sogar „Time-to-contact“-Mechanismen von Bedeutung? In einem Prototyp-Experiment konnten wir zeigen, dass die Versuchspersonen auch dann die objektive Geschwindigkeit der Fahrzeuge vergleichen, wenn sich ein Fahrzeug in einem Winkel von 45° zur Blickrichtung bewegt. Will man weiterführende Einsichten in die Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit erhalten, so müssen zukünftige Untersuchungen auf

jedem Fall die „Freiheit“ der Bewegungsrichtung in ihre Überlegungen einbeziehen.

Im Gegensatz zu McKee et al. (1989) sind wir überzeugt, dass die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit von ökologischer Bedeutung ist. Sicherlich lässt sich die Verhaltensleistung aus unserem Anfangsbeispiel – dem Vorhersagen der zukünftigen Position anderer bewegter Verkehrsteilnehmer – auch anders als durch Verwendung der objektiven Geschwindigkeit erklären. Jedoch benötigen alle anderen Vorgehensweisen, wie beispielsweise die Auswertung des optischen Flusses mehr Ressourcen bei der Informationsverarbeitung. Wir sehen die Geschwindigkeitskonstanz als integralen Bestandteil komplexer Verhaltensleistungen, die zu ihrer Funktionsfähigkeit eine Vorhersage der zukünftigen Position anderer bewegter Objekte der Szene benötigen.

7.18 Bedeutung der Ergebnisse für Entwickler virtueller Welten

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen können Entwicklern virtueller Welten helfen, den räumlichen Eindruck dieser Welten zu verbessern. Dies gilt besonders, wenn es darum geht, den räumlichen Eindruck bewegter Objekte zu verbessern. Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei der Implementierung von Simulationen besonders darauf zu achten ist, dass die relative Größe der dargestellten Objekte korrekt ist. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen können im Gegenzug aber auch bewusst „missbraucht“ werden, um die Geschwindigkeitswahrnehmung in virtuellen Welten zu manipulieren. Sollte sich die wahrgenommene Geschwindigkeit eines Objektes aufgrund räumlich-zeitlicher Beschränkungen der verwendeten Technologie in einer Simulation von der erwarteten Geschwindigkeit unterscheiden, ist es ein Leichtes die wahrgenommene Geschwindigkeit des Objektes zu verändern, indem man seine Größe verändert. Eine solche Manipulation wird sicherlich nicht immer möglich sein, da Veränderungen der Größe eines Objektes auch andere Aspekte der Wahrnehmung beeinflussen.

Unsere Ergebnisse weisen ferner darauf hin, dass weder stereoskopische Betrachtung noch Parallaxeninformation, falls einzeln dargestellt, in der Lage sind, die wahrgenommene Geschwindigkeit von Objekten im Raum zu verbessern. Erst durch die Kombination der beiden Methoden ergibt sich eine signifikante Verbesserung der Geschwindigkeitskonstanz. Die nachfolgende Schlussfolgerung mag weit hergeholt sein, aber die Ergebnisse unserer Untersuchungen deuten auf Objektebene bereits an, was auch auf Szenenebene angenommen werden kann. Der Einsatz von Stereobrillen allein genügt nicht um den räumlichen Eindruck und daraus abgeleitete Verhaltensleistungen signifikant zu verbessern. Es bedarf einer Kombination von relevanten Informationen – im vorliegenden Fall Stereo und Bewegungsparallaxe - um eine Verbesserung zu erreichen. Unabhängig davon, ob sich der Beobachter in einem simulierten Fahrzeug befindet oder, ob er einfach auf der Stelle steht sollten die Kopfbewegungen des Beobachters gemessen werden und direkt in die Darstellung der Szene einfließen. Unter solchen Bedingungen würde immer dann Bewegungsparallaxeninformation erzeugt, wenn sich der Kopf des Beobachters vor- oder rückwärts

bewegt. Ein Kriterium für eine derartige Vorgehensweise ist allerdings, dass die Bildwiederholrate der Simulation möglichst hoch sein muss.

Eigentlich eine Trivialität, aber dennoch wichtig ist die Beobachtung, dass Vorwissen des Menschen über bestimmte Zusammenhänge in seiner Umwelt einen sehr starken Einfluss auf die Wahrnehmung hat. Wie am Beispiel des Lkw-Experimentes aber auch der Flugzeug-Illusion gezeigt wurde, wird die objektive Geschwindigkeit von Gegenständen, die gleich groß sind und sich gleich schnell bewegen immer dann unterschiedlich eingeschätzt, wenn sich das Vorwissen des Beobachters im Zusammenhang mit den betrachteten Objekten unterscheidet. Eine allgemeinere Formulierung dieses Ergebnisses lautet wie folgt: Was der Mensch letztendlich wahrnimmt ist von der Kombination aus Vorwissen und der zur Verfügung stehenden sensorischen Information abhängig. Der Beobachter kann mit Hilfe seines Vorwissens auch bei minimalen Informationsgehalt der Umweltinformation die richtigen Schlussfolgerungen ziehen. Unsere Aufgabe ist es herauszufinden, welches Vorwissen Beobachter besitzen und, welche Informationen angeboten werden müssen, damit die Kombination aus Vorwissen und Information optimal ausgenutzt werden kann. Wir sind überzeugt, dass bei gezielter Anwendung dieser Vorgehensweise bei gleicher Rechenleistung zusätzliche Informationen vermittelt werden könnten.

7.19 Anmerkungen zur Darstellung von Fahrzeugen

Im Rahmen informeller Tests sowie der Experimente zur Geschwindigkeitskonstanz haben wir von unseren Versuchspersonen eine Reihe von Hinweisen zur Darstellung von Fremdfahrzeugen³¹ erhalten. Häufig genügen bereits kleine Änderungen der Darstellung um ein realistischeres Erscheinungsbild der Fahrzeuge zu erhalten. Inwiefern einzelne Modifikation nur Schönheitskorrekturen darstellen oder sich entscheidend auf die Wahrnehmung der Simulationsteilnehmer auswirken kann an dieser Stelle nicht entschieden werden.

In vielen Simulationen scheinen die Fremdfahrzeuge über dem Untergrund zu schweben. Da der Beobachter die Fahrzeuge nicht direkt mit der darunter liegenden Grundfläche in Verbindung bringen kann, kommt es zu Fehleinschätzungen der Entfernung der Fahrzeuge. Folgende zum Teil geringfügige Änderungen der Darstellung der Szene und des Fahrzeuges können hier Abhilfe schaffen.

1. Ein kleiner Teil der Räder des virtuellen Fahrzeuges „schneidet in das Terrain ein“.
2. Das Fahrzeug wirft einen Schatten, der in Kontakt mit der Grundfläche steht. Die Erfahrung zeigt, dass es sich dabei nicht um einen komplexen Schatten handeln muss, dessen genaue Form und Position sich zudem laufend an der simulierten Lichtquelle orientieren. Die

³¹ Alle Fahrzeuge einer Szene mit Ausnahme des Fahrzeuges in welchen sich der Simulationsteilnehmer befindet werden als Fremdfahrzeuge bezeichnet.

Darstellung eines einfachen Schattens genügt bereits, um die Beziehung zwischen Grundfläche und Fahrzeug herzustellen.

Im Nahbereich wirkt sich des weiteren die Simulation von drehenden Rädern auf das Erscheinungsbild eines Fahrzeuges aus. Lokale Bewegungsinformationen können, wie unser Experiment mit der Roboterfigur zeigen konnten, sehr hilfreich bei der Einschätzung der objektiven Geschwindigkeit eines bewegten Körpers sein. Die Ausrichtung der Vorderräder ist ferner ein guter Hinweis für die zukünftige Bewegungsrichtung des Fahrzeuges.

Oft bewegen sich Fremdfahrzeuge in Simulationen so gleichförmig und gleichmäßig, als ob sie von einem unsichtbaren Faden gezogen werden. In der natürlichen Umgebung zeigen Fahrzeuge aber entsprechend ihrer Geschwindigkeit, ihrer Masse, der Motorstärke, der Einstellung der Federung (usw.) und der Beschaffenheit des Untergrundes ein hochkomplexes Muster an Bewegungen. Die Charakteristik dieser Bewegungen gibt Aufschluss über den Fahrzustand (Fahrgeschwindigkeit, konstante Geschwindigkeit oder Beschleunigung, Kurvenfahrt, etc.) und vermittelt des weiteren indirekt Informationen über die Beschaffenheit des Untergrundes. Beispielsweise hebt sich die Nase eines Fahrzeuges beim Beschleunigen und senkt sich beim Abbremsen. Das exakte Bewegungsmuster beim Heben der Nase ermöglicht vergleichsweise spezifische Aussagen über den Fahrzustand zu machen.

Ideal wäre folglich, wenn jedes Fremdfahrzeug in einer Simulation mit einer Fahrdynamik versehen würde. Da dies mangels Rechenleistung zumeist nicht realisierbar ist, können die dynamikbedingten lokalen Bewegungen des Fahrzeuges auch auf einer heuristischen Basis implementiert werden. Um weiterhin Rechenleistung einzusparen sollte die Dynamik der Fremdfahrzeuge nur bis zu einer bestimmten Entfernung simuliert werden. Bewegungen kleiner Amplitude können im Fernbereich durch die Computer-Graphik nicht mehr aufgelöst werden.

8 Navigation in realen und virtuellen Welten

8.1 Einleitung

Im Bereich der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung bietet die virtuelle Realität vor allem der Navigationsforschung die meistversprechendsten Perspektiven. Virtuelle Welten ermöglichen die Darstellung realistisch erscheinender Landschaften und Städte unter gut kontrollierten Laborbedingungen. Vor allem die Möglichkeit zur gezielten Manipulation der Eigenschaften großer Objekte wie z.B. Häuser machen nun die Durchführung von Experimenten möglich, die an einem zu hohen Aufwand gescheitert waren (siehe Abschnitt 2.3, siehe auch Distler, 1996; Bülthoff, Foese-Mallot, Mallot, 1997; Peruch, Gaunet, 1997; Van Veen, Distler, Braun, Bülthoff, 1998; Distler, Van Veen, Braun, Bülthoff, 1998; Distler, Van Veen, Braun, Bülthoff, Franz, Heinz, 1998; Bülthoff, Van Veen, 1999).

In unserer Arbeitsgruppe haben wir im Verlauf der letzten Jahre eine Reihe von Untersuchungen zum Navigations- und Orientierungsverhalten des Menschen in virtuellen Welten durchgeführt. Der Ausgangspunkt dieser Arbeiten war eine Theorie zur "Ansicht-basierten Navigation" (Schölkopf, Mallot, 1995). Aufbauend auf diese Theorie haben Gillner & Mallot (1998) das Navigationsverhalten des Menschen in "Hexatown", einer rein künstlichen Stadt mit einer hexagonalen Struktur des Straßenverlaufs, untersucht. Weitere in „Hexatown“ durchgeführte Arbeiten umfassen die Unterscheidung der Bedeutung lokaler und globaler Landmarken (Steck, Mallot, 1999) sowie die Untersuchung zur Rolle von Hangneigungen beim Aufbau eines Ortsgedächtnisses (Mochnatzki, Steck, Mallot, 1999). Im Rahmen eines zweiten Projektes haben wir ein 3D Computer-Graphikmodell des Innenstadtbereichs von Tübingen erstellt ("Virtual Tübingen", Van Veen, Distler, Braun, Bülthoff, 1998). Erste Experimente in "Virtual Tübingen" konnten zeigen, dass das Zeigen der Richtung von Plätzen in einem Panoramamodell und in der "realen" Stadt mit ähnlicher Genauigkeit ausgeführt wird (Van Veen, Sellen, Bülthoff, 1998).

Sofern man die Erkenntnisse von in virtuellen Welten durchgeführten Experimenten zur Erklärung menschlichen Verhaltens in der realen Welt verwenden möchte, muss sichergestellt werden, ob und inwieweit die Ergebnisse und Erkenntnisse der Untersuchungen virtueller Welten übertragbar sind.

8.2 Versuchsparadigma

Im folgenden stellen wir ein Versuchsparadigma vor, das die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Verhaltensversuchen in virtuellen Welten zur Erklärung menschlichen Verhaltens in der natürlichen Umwelt gewährleisten soll. Kernstück des Paradigmas ist der Vergleich von Verhaltensleistungen in der natürlichen und einer entsprechenden virtuellen Welt. Findet man dabei unterschiedliches Verhalten in beiden Umwelten, ist es Aufgabe des Versuchsleiters, aufgrund der genauen

Eigenschaften der Unterschiede herauszufinden, wodurch diese bedingt sind, um so eventuell Abhilfe schaffen zu können. Falls keine Möglichkeit besteht die virtuelle Welt so zu gestalten, dass das Verhalten der Versuchspersonen in beiden Umwelten ähnlich ist, müssen die Unterschiede im Verhalten in die Interpretation der Ergebnisse einfließen. Sofern sich keine Unterschiede im Verhalten zwischen natürlicher und virtueller Welt ergeben, können die Folgeexperimente einer Untersuchung in der virtuellen Welt durchgeführt werden, wobei der Versuchsleiter dann von den Vorteilen von VR bei der Durchführung von Navigationsexperimenten profitieren kann.

Die Anwendung dieses Paradigmas führt zu einem erhöhten Aufwand bei der Durchführung der Experimente. Der Versuchsleiter wird deshalb im Einzelfall entscheiden müssen, ob der Nutzen einer solchen Vorgehensweise den Aufwand rechtfertigt.

8.3 Erwerb räumlichen Wissens in VR-Umgebungen

Vergleichende Experimente von Verhaltensleistungen in natürlichen und virtuellen Welten finden bereits seit einiger Zeit Anwendung in VR-Simulationen, die Einsatzkräfte mit unbekanntem Gelände vertraut machen. Sowohl Soldaten als auch Rettungspersonal sehen sich bei Einsätzen oftmals mit einer riskanten und gefährlichen Aufgabe konfrontiert. Sind die Einsatzkräfte zudem nicht mit dem Einsatzgelände vertraut, erhöht sich das Gefahrenpotential um ein Vielfaches, da sie dann einen signifikanten Teil ihrer Zeit aufwenden müssen, um sich im Einsatzgebiet zurecht zu finden. Die Verwendung virtueller Welten bietet hier die Möglichkeit die Einsatzkräfte vor dem aktuellen Gefahreinsatz mit dem Gelände vertraut zu machen, ohne sich dabei vor Ort befinden zu müssen. Zu Testzwecken wurden VR-Systeme bereits beim Training von Soldaten (United States Army Research Institute for the Behavioural and Social Sciences, e.g. Singer, Allen, McDonald, Gildea, 1997) und der Vorbereitung von Feuerwehrleuten auf ihr Einsatzgebiet (Bliss, Tidwell, Guest, 1997) angewendet. Diesen Anwendungen liegt die Idee zugrunde, dass das Personal in dem Computer Graphikmodell eines real existierenden Raumes lernt sich zu orientieren. Das in der virtuellen Welt erworbene räumliche Wissen³² soll dann später im Ernstfall die Orientierung in der entsprechenden realen Umgebung erleichtern.

Eine kommerzielle Anwendung virtueller Welten zum Training in VR erfordert aber die Gewährleistung, dass in der virtuellen Welt erworbenes räumliches Wissen geeignet ist, dem Simulationsteilnehmer eine problemlose Orientierung in der realen Welt zu ermöglichen (Übertragbarkeit). Um beurteilen zu können, ob eine Simulationsanwendung diesen Anforderungen entspricht, empfiehlt sich auch hier ein Vergleich der Struktur und der Qualität räumlichen Wissens das im Simulator und in der natürlichen Umgebung erworbenen wurde. Im VR-Umfeld haben bereits

mehrere Arbeiten die Verwendung vergleichender Untersuchungen aufgegriffen (Witmer, Bailey, Knerr, 1996; Bliss, Tidwell, Guest, 1997; Ruddle, Payne, Jones, 1997 auf der Basis der Experimente von Thorndyke, Hayes-Roth, 1982; Waller, Hunt, Knapp, 1998).

Witmer et al. (1996) konnten zeigen, dass die Qualität von Routenwissen, das in der virtuellen oder der realen Welt erworben wurde, vergleichbar ist, sofern die virtuelle Welt ein hinreichend genaues Abbild der realen Welt darstellt. Ruddle et al. (1997) replizierten ein Experiment von Thorndyke et al. (1982), welches die Genauigkeit von Entfernungs- und Richtungsschätzungen in einem existierenden Bürogebäude untersucht hat, in VR. Auch Ruddle et al. (1997) finden, dass die Genauigkeit der Entfernungs- und Richtungsschätzungen in der virtuellen und der realen Welt vergleichbar ist. Bei Waller et al. (1998) lernten Gruppen von Versuchspersonen die räumliche Konfiguration eines Labyrinths mittels sechs unterschiedlicher Medien (kein Training, echtes Labyrinth, Karte, VR Desktop, Immersive VR kurze Lernphase, Immersive VR lange Lernphase). Nachfolgend wurde ihre Fähigkeit, sich zurechtzufinden im „realen“ Labyrinth getestet. Kurzzeitiges Training in VR ist den Ergebnissen zufolge nicht effizienter als Kartenstudium. Dagegen war die Orientierungsfähigkeit von Personen, denen einer längerer Zeitraum zum Lernen in VR zur Verfügung stand, sogar etwas besser als die Orientierungsfähigkeit der Gruppe, die im realen Labyrinth trainiert hatte.

Insgesamt gesehen, legen die Ergebnisse dieser Untersuchungen nahe, dass der Erwerb räumlichen Wissens in der realen Welt schneller erfolgt als in der entsprechenden virtuellen Welt. In der virtuellen Welt erworbenes räumliches Wissen ist im allgemeinen weniger genau als in der realen Welt erworbenes räumliches Wissen. Dies ist nicht besonders überraschend, da alle Simulationsteilnehmer inklusive der VR-Experten weniger Erfahrung beim Erwerb räumlichen Wissens in der virtuellen als in der realen Welt haben. Da sich zudem die Stimulation der Sinnessysteme in der virtuellen und der entsprechenden realen Welt teilweise erheblich unterscheidet, sind Unterschiede in der Struktur der kognitiven Karten fast vorprogrammiert. In der realen Welt haben wir uns im Verlauf unserer Ontogenese effiziente Strategien zurechtgelegt, die uns eine gezielte Auswertung der Informationen der Umwelt ermöglichen. Durch Einschränkungen der Technologie, generelle Unterschiede im Informationsfluss zwischen virtueller und realer Welt und durch einen beschränkten finanziellen Rahmen fehlen virtuellen Welten essentielle Informationen zum Erwerb räumlichen Wissens. Ziel von Vergleichsstudien ist es herauszufinden, welche Informationen fehlen und wie diese Informationen eventuell gleichwertig ersetzt werden können.

In diesem Zusammenhang haben Waller, Hunt & Knapp (1998) das Konzept der Qualität („*fidelity*“) virtueller Welten definiert. Charakterisiert wird der Qualitätsanspruch durch den Umfang, in dem die virtuelle Welt und die Interaktion mit dieser Welt für den Simulationsteilnehmer ununterscheidbar von der Wahrnehmung und der Interaktion mit der realen Welt sind. Die Autoren

³² Die Struktur räumlichen Wissens wird in der Literatur mit dem Begriff „kognitive Karte“ (Tolman, 1948) bezeichnet.

unterscheiden ferner zwischen dem Einfluss von Umwelt- (“*environmental*”) und Interaktionsfaktoren (“*interface fidelity*”) auf die Qualität einer Anwendung. Dabei beschreiben Umweltfaktoren das Ausmaß der Ähnlichkeit zwischen der realen und virtuellen Welt. Die Verwendung von Texturen stellt beispielsweise eine häufig angewandte Methode zur Verbesserung des Erscheinungsbildes virtueller Szenen dar. Die Qualität der Darstellung virtueller Welten kann aber auch durch Zuhilfenahme von Faktoren verbessert werden, die in der natürlichen Umwelt nicht zur Verfügung stehen. Beispielsweise haben Darken & Sibert (1996a, 1996b) gefunden, dass sich die Fähigkeit der Simulationsteilnehmer zur Orientierung verbessert, wenn der simulierten Landschaft ein rechteckiges Liniengitter überlagert wird. Interaktions- oder auch Schnittstellenfaktoren definieren die Art und Weise wie der Simulationsteilnehmer mit der virtuellen Welt interagiert. Viele Anwendungen verwenden nach wie vor sehr einfache Eingabegeräte wie Computer-Maus, Tastatur, Joystick und Spacemouse. Die meisten Benutzer sind zwar mit der grundlegenden Bedienung dieser Geräte vertraut, die wenigsten von ihnen haben jedoch diese Geräte jemals zur Fortbewegung in 3D-Simulationen von Großfeldumgebungen verwendet. Andere Interaktionsgeräte wie Laufbänder (Witmer, Kline, 1998) und das VR-Fahrrad (Distler, 1996) bauen dagegen auf natürliche Metaphern der Fortbewegung auf und sind deshalb zumindest einfacher (stressfreier) zu bedienen. Ob und inwieweit die Qualität des räumlichen Wissens unter diesen Bedingungen verbessert wird, ist unklar. Mit der Größe des Gesichtsfeldes und der Verwendung des VR-Fahrrades werden wir im folgenden Experiment den Einfluss von je einem Umwelt- und einem Interaktionsfaktor auf die Genauigkeit von Richtungs- und Entfernungsschätzungen in einer simulierten Großfeldumgebung untersuchen.

8.4 Schätzen der Richtung und Entfernung von Plätzen in der realen und virtuellen Welt

8.4.1 Einleitung

Vorrangiges Ziel dieses Experimentes ist es, die Anwendung unseres Versuchsparadigmas zum Vergleich des Navigationsverhaltens in der realen und virtuellen Welt vorzustellen. Im Rahmen des Experimentes war es Aufgabe der Versuchspersonen, die Richtung und Entfernung von Plätzen in einer sogenannten Großfeldumgebung zu schätzen. Nach Kuipers (1978) handelt es sich um eine Großfeldumgebung, wenn der Betrachter von seinem Standpunkt aus nicht in der Lage ist die gesamte Umgebung zu überblicken. Kann der Betrachter dagegen die Umgebung überblicken, handelt es sich um eine Kleinfeldumgebung. Eine etwas andere Unterscheidung liefern Steck & Mallot (1999). Sie unterscheiden zwischen offenen und zusammengesetzten Umgebungen (siehe auch Trullier, Wiener, Berthoz, Meyer, 1997). In einer zusammengesetzten Umgebung kann der Betrachter sein Ziel vom seinem Startpunkt aus nur dann erkennen, wenn er sich bereits im entsprechenden Kompartiment befindet. Gemeinsam ist beiden Unterscheidungen, dass der Betrachter das Ziel nicht vom Startpunkt

aus einsehen kann, d.h. die Werte der Richtung und der Entfernung können nicht auf „einen Blick“ erschlossen werden, sondern mehrere zeitlich aufeinander folgende Informationsinhalte müssen integriert werden. Da das Ziel unseres Experimentes die Einführung des Versuchsparadigmas ist, werden wir an dieser Stelle auf eine Einführung der Bedeutung von Richtungs- und Entfernungsschätzungen für die Struktur kognitiver Karten verzichten. Neben dem Vergleich des Verhaltens der Versuchspersonen in der virtuellen und der natürlichen Umwelt werden wir in der virtuellen Welt ferner den Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes sowie der Verwendung des VR-Fahrrades untersuchen.

8.4.2 Versuchsdurchführung in der natürlichen Umwelt

Die Versuchspersonen wurden in einer Landschaft auf der schwäbischen Alb nahe Blaubeuren von einem Startpunkt *S* zu zwei Kontrollpunkten *K1* und *K2* geführt (Abb. 49). Die Fortbewegung erfolgte zu Fuß bei mittlerer Geschwindigkeit (≈ 4 km/h). Der größte Teil des Geländes war von Waldflächen bedeckt (Abb. 49, grüne Flächen), der Pfad führte jedoch auch über einige freie Flächen (Felder und Wiesen, Abb. 49, gelbe Flächen). Während Waldflächen verhindern, dass sich Versuchspersonen einen Überblick über das Gelände verschaffen, ist dies während der Überquerung freier Flächen möglich. An den beiden Kontrollpunkten waren die Versuchspersonen angehalten, die Richtung und Entfernung des Startpunktes bzw. des anderen Kontrollpunktes zu schätzen. Am Kontrollpunkt *K1* mussten sie die Richtung und Entfernung des Startpunktes *S* und am Kontrollpunkt *K2* die Richtung und Entfernung von *S* und *K1* einschätzen. Während sie die Aufgabe ausführten, wurden die einzelnen Versuchspersonen von der Gruppe getrennt. Die Angabe der Luftlinienentfernung erfolgte verbal in der bevorzugten Maßeinheit. Zur Angabe der Richtungsschätzung bekamen die Versuchspersonen ein Blatt Papier (A4) mit einem aufgezeichneten Kreis vorgelegt. Das Blatt Papier war zuvor mit Hilfe eines „Global Positioning Systems (GPS)“ nach Norden ausgerichtet worden. Die Versuchspersonen sollten sich vorstellen, sie befänden sich in der Mitte des Kreises. Die Richtung des gefragten Platzes (*S* und/oder *K1*) zeigten sie durch eine Kennzeichnung auf der Umrisslinie des Kreises an. Nach dem Durchführen der Aufgabe wurde es den Versuchspersonen nicht erlaubt sich zu jenen zu gesellen, welche die Aufgabe noch nicht ausgeführt hatten. Alle Versuchspersonen wurden erst beim Erreichen des ersten Kontrollpunktes mit der Aufgabe vertraut gemacht.

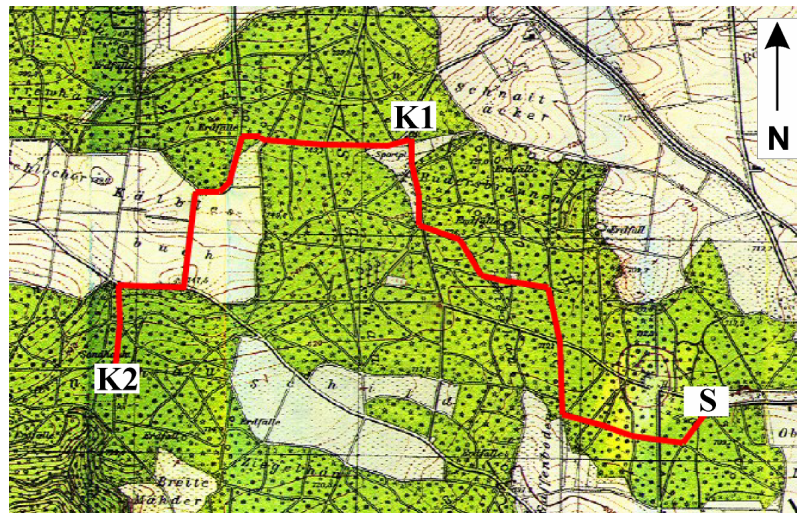


Abb. 49 Die Karte zeigt die Landschaft auf der schwäbischen Alb nahe Blaubeuren. Der in der Karte dargestellte Bereich umfasst 3.5x2.5 km. *S* bezeichnet den Startpunkt, *K1* und *K2* zeigen die Position der Kontrollpunkte. Die rote Linie zeigt dem Pfad entlang dessen die Versuchspersonen geführt wurden.

8.4.3 Versuchsdurchführung in der virtuellen Umwelt

Die Versuche in der virtuellen Umwelt wurden in zwei Generationen des VR-Fahrrad-Simulators durchgeführt (Abb. 50, siehe auch Kapitel 5 und Anhang A). Da die Simulationsanlage der dritten Generation (Abb. 50, rechts, Van Veen, Distler, Braun, Bühlhoff, 1998) bereits in Kapitel 5 eingeführt wurde, sollen hier nur kurz die für die Durchführung des Experimentes entscheidenden Eigenschaften zusammengefasst werden. Die Interaktion der Versuchspersonen mit der virtuellen Welt erfolgte mit dem VR-Fahrrad, die Berechnung der Szene und der Dynamik wurde auf einer Silicon Graphics™ Onyx2 InfiniteReality durchgeführt. Die Darstellung der Szene erfolgte auf einer zylinderförmigen Leinwand, die den Versuchspersonen ein Gesichtsfeld von 180x50° bot. Die Interaktion der Versuchspersonen erfolgte auch in der ersten Generation der Simulationsanlage (Abb. 50, links, Distler, 1996, siehe auch Anhang A) mit dem VR-Fahrrad. Die Berechnungen und das Erzeugen der Szene wurden allerdings auf einer Silicon Graphics™ Onyx RealityEngine2 durchgeführt. Die Szene wurde auf einer flachen Leinwand mit einem Gesichtsfeld von 50x40° dargestellt.



Abb. 50 Das linke Bild zeigt die Simulationsanlage der ersten, das rechte Bild die Simulationsanlage der dritten Generation.

8.4.4 Computer-Graphikmodell der Landschaft

Zur Durchführung der Experimente haben wir ein 3D Computer-Graphikmodell (Abb. 51) des Landstriches auf der schwäbischen Alb erstellt. Nach dem Einscannen der Karte (Abb. 49) wurde ein Spline-Werkzeug verwendet, um den Verlauf der Straßen und Wege zu markieren. Die Splines wurden nachfolgend mittels eines eigens entwickelten Software-Werkzeuges in Straßen umgewandelt. Nach dem Auffüllen der Flächen zwischen den Straßen mit Polygonen, haben wir diese per Hand in dem 3D-Modeller Medit™ texturiert. Da das virtuelle Terrain letztendlich ca. 10.000 Bäume enthielt, erwies sich das Erzeugen der Wälder als anspruchsvolle Aufgabe. Diese Zahl an Bäumen stellt zwar nur einen Teil der Bäume der natürlichen Landschaft dar, aber im allgemeinen war gewährleistet, dass wesentliche Verdeckungen der natürlichen Umwelt auch in der virtuellen Welt gegeben waren. Durch Verwendung einer eigens entwickelten Software waren wir in der Lage, gezielt Mischwälder oder Monokulturen mit Bäumen und Büschen unterschiedlicher Größe zu erzeugen. Da sich die Höhenwerte der Landschaft insgesamt nur um wenige Meter unterschieden, haben wir im Modell auf eine Simulation der Höhenunterschiede verzichtet.

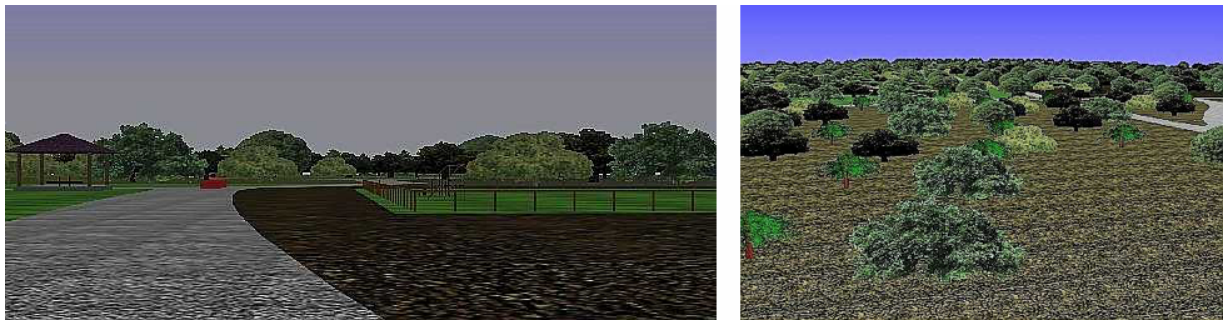


Abb. 51 Digitale Schnappschüsse des 3D Computer-Graphikmodells der Landschaft auf der schwäbischen Alb. Das linke Bild zeigt eine Ansicht des ersten Kontrollpunktes K1, während das rechte Bild eine Übersicht über ein Waldstück darstellt.

8.4.5 Echtzeit-Simulation

Die Echtzeit-Animation wurde in der Programmiersprache C unter Verwendung der Bibliothek Iris Performer- (Version 2.1) implementiert. Um die Geschwindigkeit der Berechnungen zu erhöhen, wurde die Landschaft einerseits in 25 Blöcke (700x500m) unterteilt und die Entfernung der Far-Clipping-Plane wurde auf 600m eingestellt. Um zu vermeiden, dass Objekte plötzlich im Gesichtsfeld der Versuchspersonen erscheinen, wurde in der Entfernung der Far-Clipping-Plane eine schwache Nebelschicht simuliert.

8.4.6 Versuchsablauf und Versuchsbedingungen

Die Versuchspersonen in der virtuellen Welt führten die gleichen Aufgaben wie in der realen Welt durch. Außerdem mussten sie zusätzlich zur Luftlinienentfernung auch noch die Länge des zurückgelegten Weges einschätzen. Aufgrund der begrenzten Größe des Gesichtsfeldes waren wir gezwungen den Ablauf der Richtungsschätzungen zu modifizieren. Sobald die Versuchspersonen an einem der Kontrollpunkte angekommen waren, wurden sie künstlich in Richtung eines roten Blocks ausgerichtet (Abb. 51, links). Da der Block bereits bei der Annäherung an den Kontrollpunkt für die Versuchspersonen sichtbar war, konnten wir gewährleisten, dass das künstliche Ausrichten mit keinen Überraschungen für die Versuchspersonen verbunden war. Zur Durchführung der Richtungsschätzungen bekamen die Versuchspersonen ein Blatt Papier (A4) mit einem aufgezeichneten Kreis vorgelegt. Im Gegensatz zur natürlichen Umwelt enthielt das Blatt noch einen Pfeil, der von der Mitte des Kreises nach oben wies. Den Versuchspersonen wurde erklärt, dass der Pfeil in Richtung des roten Blockes in der virtuellen Welt zeigt.

Um den Einfluss von Umwelt- und Interaktionsfaktoren auf das Einschätzen der Richtung und Entfernung zu untersuchen, wurde das Experiment in der virtuellen Welt in vier Bedingungen (VW 1 – VW 4) durchgeführt. Die Bedingung VW 1 wurde in der ersten Generation, die Bedingungen VW 2–VW 4 wurden in der dritten Generation der Simulationsumgebung durchgeführt. Die Größe des Gesichtsfeldes in Bedingung VW1 betrug somit $50 \times 40^\circ$ und $180 \times 50^\circ$ in den Bedingungen VW2 – VW 4. Ein Vergleich der Ergebnisse der Bedingungen VW 1 und VW 2 sollte folglich einen Einblick in die Bedeutung der Größe des Gesichtsfeldes ermöglichen. VW2 und VW3 unterscheiden sich im Vorhandensein einer Anweisung für die Versuchsperson. Während die Versuchspersonen in den Bedingungen VW 1 und VW 2 genau wie in der natürlichen Umwelt vor dem Erreichen des ersten Kontrollpunktes keinerlei Hinweise über ihre Aufgabe erhielten, wurden sie in den Bedingungen VW 3 und VW 4 von Anfang an auf ihre Aufgabe hingewiesen. Hiermit wollten wir testen, ob gezielte Informationsverarbeitung sich positiv auf die Qualität der Schätzungen auswirkt. Die Fortbewegung der Versuchspersonen erfolgte in den Bedingungen VW 1 – VW 3 aktiv durch Treten und Lenken auf dem VR-Fahrrad. In Bedingung VW 4 wurden die Versuchspersonen automatisch (passiv) fortbewegt. Die Daten zur Simulation der passiven Fortbewegung wurden aufgezeichnet während eine Versuchsperson das Experiment unter „aktiver“ Bewegung durchführte. Die mittlere Geschwindigkeit der Fortbewegung in der passiven Bedingung betrug 21 km/h. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Bedingungen VW 3 und VW4 wollten wir herausfinden, inwieweit sich der Bewegungs- und Aktivitätsmodus auf den Erwerb räumlichen Wissens auswirkt. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den vier Versuchsbedingungen der virtuellen Welt sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

<i>Bedingung</i>	<i>Simulationsumgebung (Generation)</i>	<i>Instruktion</i>	<i>Modus der Fortbewegung</i>
<i>VW 1</i>	<i>I</i>	<i>Keine</i>	<i>mit Fahrrad (aktiv)</i>
<i>VW 2</i>	<i>III</i>	<i>Keine</i>	<i>mit Fahrrad (aktiv)</i>
<i>VW 3</i>	<i>III</i>	<i>Ja</i>	<i>mit Fahrrad (aktiv)</i>
<i>VW 4</i>	<i>III</i>	<i>Ja</i>	<i>als Beifahrer (passiv)</i>

Tabelle 7. Wesentliche Unterschiede zwischen den vier Bedingungen des Experimentes in der virtuellen Welt.

8.5 Unterschiede in der Versuchsdurchführung zwischen realer und virtueller Welt

Der Versuchsablauf und die Versuchsbedingungen in der realen und virtuellen Welt unterschieden sich in folgenden Aspekten:

- Die Versuchspersonen in der realen Umgebung waren in einer Gruppe unterwegs, während die Versuchspersonen in der virtuellen Welt nur in Begleitung des Versuchsleiters unterwegs waren.
- In der natürlichen Umgebung erfolgte die Fortbewegung zu Fuß, in der virtuellen Welt mit dem VR-Fahrrad.
- Das Experiment in der realen Welt dauerte 2 Stunden, während die Durchführung des Experimentes in der virtuellen Welt maximal 20-30 Minuten in Anspruch nahm.
- In der realen Welt konnten sich die Versuchspersonen zu jedem Zeitpunkt umschaun. Dagegen war die Blickrichtung in der Simulation an die Ausrichtung des Fahrrades gekoppelt. Ein „Umschaun“ war also nur durch das Fahren einer Schleife möglich.
- Das Experiment in der natürlichen Umwelt wurde an einem sonnigen Tag durchgeführt. Da das Experiment im November stattfand, bewegte sich die Sonne wegen des flachen Sonnenstandes um einen relativ großen Betrag. Prinzipiell ist eine Verwendung der Sonne zur Orientierung denkbar, wir vermuten jedoch, dass unter den vorliegenden Bedingungen nur „Experten“ den Sonnenstand zur Bestimmung der Richtung von Plätzen verwenden konnten. In der virtuellen Welt haben wir aufgrund der beschränkten Größe des vertikalen Gesichtsfeldes auf eine Darstellung der Sonne verzichtet.

8.6 Versuchspersonen

In allen fünf Versuchsbedingungen nahmen je acht Versuchspersonen teil. Keine Versuchsperson führte mehr als eine Bedingung des Experimentes durch. In der virtuellen Umgebung wurden die Versuchspersonen auf die Möglichkeit des Auftretens von Symptomen der Simulationskrankheit aufmerksam gemacht. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, das Experiment sofort zu beenden, falls sie Anzeichen derartiger Symptome verspürten, was jedoch nicht der Fall war.

8.7 Ergebnis

8.7.1 Richtungsschätzungen

Die Richtungsschätzungen der einzelnen Versuchspersonen wurden durch Verwendung zirkulärer Statistik (Batschelet, 1980) ausgewertet. Die durchschnittlichen Fehler der Richtungsschätzungen der Versuchspersonen sind in Abb. 52 dargestellt. Paarweise t-Tests ergaben keine signifikanten Unterschiede ($p > 0.05$) in der Qualität der Richtungsschätzungen in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung. Wenn man die Richtungsschätzungen der Bedingung NW (=natürliche Umwelt) nur mit den ersten drei Versuchsbedingungen in der virtuellen Welt VW 1 – VW 3 vergleicht, so scheint die Genauigkeit der Schätzungen in der natürlichen Umwelt etwas höher zu sein. Erstaunlich ist, dass gerade bei passiver Fortbewegung (VW 4) die Genauigkeit der Richtungsschätzung zumindest bei visueller Betrachtung des Graphen besser ist als in den restlichen Bedingungen der virtuellen Welt. Die Größe der Standardfehler ist unter allen Bedingungen vergleichbar. Generell hatten die Versuchspersonen einen Trend die Plätze “als weiter links liegend” einzuschätzen.

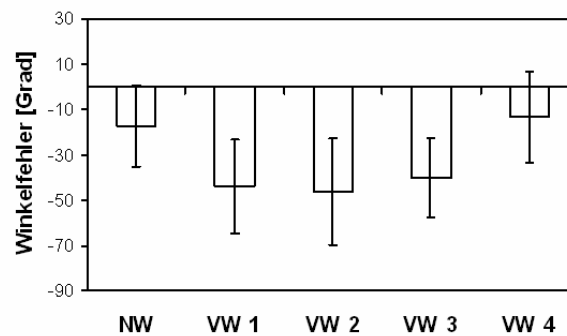


Abb. 52 Durchschnittlicher Fehler der Richtungsschätzungen in Abhängigkeit von der Versuchsbedingung. Jeder Fehlerbalken stellt den Mittelwert aus acht Versuchspersonen bei je drei Schätzungen (K1-S, K2-S, K2-K1) pro Person dar. Die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

8.7.2 Entfernungsschätzungen

8.7.2.1 Fehlertypen

Die Ergebnisse der Entfernungsschätzungen werden zum einem als vorzeichenbehafteter und zum anderen als vorzeichen-unbehafteter Fehler dargestellt. Der vorzeichenbehaftete Fehler berechnet sich zu:

$$\text{vorzeichenbehafteter Fehler} = \text{geschätzte Entfernung} - \text{tatsächliche Entfernung}$$

Der vorzeichen-unbehaftete Fehler wurde wie folgt berechnet:

$$\text{vorzeichen-unbehafteter Fehler} = \text{ABS}(\text{vorzeichenbehafteter Fehler})$$

ABS berechnet den absoluten Wert des Parameters. Der vorzeichenbehaftete Fehler ist hilfreich, um zwischen einem Unterschätzen und einem Überschätzen der Entfernung zu unterscheiden,

während der vorzeichen-unbehaftete Fehler Aussagen über die durchschnittliche Größe des Fehlers erlaubt. Die zur Berechnung der Fehler verwendeten tatsächlichen Werte der Entfernungen sind in Tabelle 8 aufgelistet.

	K1-S	K2-K1	K2-S
Luftlinie	1840	1650	2675
Zurückgelegter Weg	2470	2271	4741

Tabelle 8. Tatsächliche Werte der Luftlinienentfernung und des zurückgelegten Weges in Metern.

8.7.2.2 Luftlinienentfernung

Der vorzeichen-unbehaftete Fehler der Schätzung der Luftlinienentfernung ist in der natürlichen Umwelt (NW) wesentlich geringer als in den Bedingungen der virtuellen Welt (Abb. 53, weiße Balken). Die Beobachtung wird auch durch die Ergebnisse zweiseitiger t-Tests bestätigt (Tabelle 9). Weder das Verwenden einer Anweisung zu Beginn des Experimentes (VW 2 vs. VW 3) noch die Größe des Gesichtsfeldes (VW 1 vs. VW 2) wirken sich hinsichtlich des vorzeichen-unbehafteten Fehlers positiv auf die Genauigkeit der Schätzung der Luftlinienentfernung aus. Wir fanden jedoch eine signifikante Verschlechterung der Genauigkeit der Entfernungsschätzung, wenn die Versuchspersonen passiv bewegt wurden (VW 4 vs. VW 1, VW 4 vs. VW 2, VW 4 vs. VW 3).

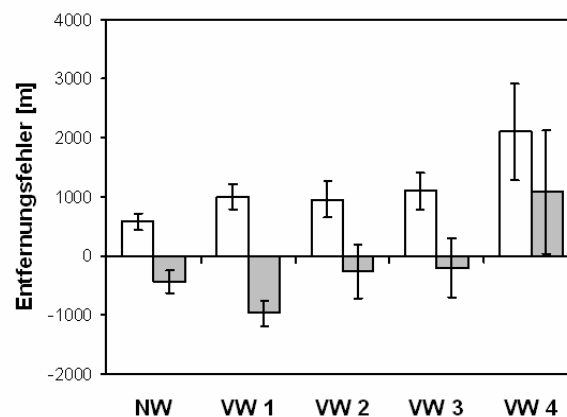


Abb. 53 Vorzeichen-unbehafteter (weiße Balken) und vorzeichenbehafteter Fehler der Schätzung der Luftlinienentfernung (graue Balken). Jeder Fehlerbalken stellt den Mittelwert aus acht Versuchspersonen und drei Schätzungen pro Person dar. Die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

	NW	VW 1	VW 2	VW 3	VW 4
NW		J	N	N	J
VW 1	J		J	J	J
VW 2	J	N		N	J
VW 3	J	N	N		J
VW 4	J	J	J	J	

Tabelle 9. Ergebnisse zweiseitiger t-Tests, die paarweise die Fehler der Schätzungen der Luftlinienentfernung vergleichen. Der Buchstabe "J" steht stellvertretend für das Vorliegen eines signifikanten Unterschiedes ($p < 0.05$), der Buchstabe "N" für das Fehlen eines solchen Effektes. Die weißen Felder zeigen die Ergebnisse für den vorzeichenbehafteten Fehler, während die grauen Felder die Ergebnisse für den vorzeichen-unbehafteten Fehler darstellen.

Die Betrachtung des vorzeichenbehafteten Fehlers (Abb. 53, graue Balken) zeigt, dass die Versuchspersonen bei passiver Bewegung die Entfernung überschätzen, während sie in allen anderen Bedingungen die Entfernung unterschätzen.

8.7.2.3 Zurückgelegter Weg

Die Werte für die vorzeichen-unbehafteten (weiße Balken) und die vorzeichenbehafteten (graue Balken) Fehler beim Schätzen der Länge des zurückgelegten Weges sind in Abb. 54 dargestellt. Die Ergebnisse der statischen Auswertung durch paarweise Durchführung zweiseitiger t-Tests sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Obwohl wir für den vorzeichen-unbehafteten Fehler signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen VW 1 einerseits und VW 3 sowie VW 4 andererseits finden, können wir daraus nicht auf einen eindeutigen Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes schließen. Der Vergleich von VW 1 und VW 2, der eigentlich dazu angelegt war den Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes zu untersuchen, ergibt keinen signifikanten Unterschied für den vorzeichen-unbehafteten Fehler. Der Einfluss des Bewegungsmodus (aktiv oder passiv) ist ebenso unklar. Während zwischen VW 1 und VW 4 und VW 2 und VW 4 ein signifikanter Unterschied vorliegt, finden wir keinen solchen für die eigentlich entscheidende Kombination VW 3 und VW 4. Erstaunlicherweise sind die Entfernungsschätzungen der instruierten Versuchspersonen signifikant schlechter als die der nicht-instruierten Versuchspersonen (VW 2 vs. VW 3).

Die Werte für den vorzeichenbehafteten Fehler weisen auf eine generelle Tendenz zum Überschätzen der Länge des zurückgelegten Weges in der Simulationsanaloge der dritten Generation (größeres Gesichtsfeld) hin.

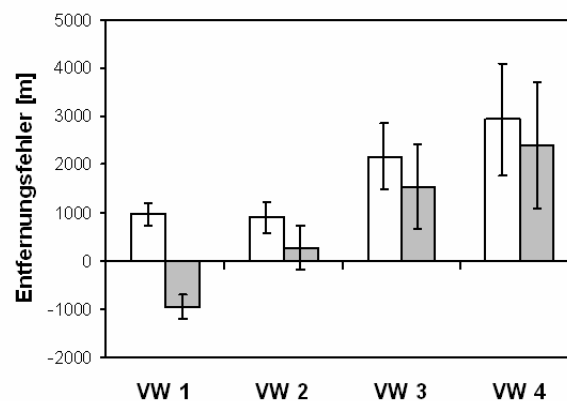


Abb. 54 Vorzeichen-unbehafteter (weiße Balken) und vorzeichenbehafteter Fehler der Schätzung der Länge des zurückgelegten Weges (graue Balken). Jeder Fehlerbalken stellt den Mittelwert aus acht Versuchspersonen und drei Schätzungen pro Person dar. Die Größe der Fehlerbalken entspricht +/- einem Standardfehler des Mittelwertes.

	VW 1	VW 2	VW 3	VW 4
VW 1		J	J	J
VW 2	N		J	J
VW 3	J	J		N
VW 4	J	J	N	

Tabelle 10. Ergebnisse zweiseitiger t-Tests, die paarweise die Fehler der Schätzungen der Länge des zurückgelegten Weges vergleichen (siehe auch Tabelle 9).

8.7.3 Diskussion

8.7.3.1 Interpretation der Ergebnisse

Die Genauigkeit der Entfernungs- und Richtungsschätzungen der Versuchspersonen ist im allgemeinen in der realen Welt höher als in der virtuellen Welt. Allerdings konnten wir nur für die Entfernungs-, nicht aber für die Richtungsschätzungen einen signifikanten Unterschied feststellen. Auf den ersten Blick erscheinen sowohl die Fehler der Richtungs- als auch die Fehler der Entfernungsschätzungen relativ groß zu sein. Allerdings sollte man hier bedenken, dass es für die Versuchspersonen der erste Kontakt mit dieser Landschaft war. Auch bot die Landschaft den Versuchspersonen keine globalen Landmarken zur Orientierung. Des weiteren hielt sich der Informationsgehalt lokaler Landmarken in Grenzen, da es sich bei den meisten lokalen Landmarken um einzelne Bäume bzw. Gruppierungen von Bäumen handelte. Wenn man ferner bedenkt, dass die Versuchspersonen in der virtuellen Welt nicht einfach über ihre Schulter zurückblicken konnten, dann kommt die Genauigkeit der Schätzungen in einem vernünftigen Rahmen zu liegen. Wir erwarten eine höhere Genauigkeit der Schätzungen, wenn anstelle der Wald- und Wiesenlandschaft eine Stadtlandschaft mit auffälligen lokalen Landmarken sowie der Verfügbarkeit globaler Landmarken verwendet wird. Unterstützt wird diese Vermutung durch die Ergebnisse von Experimenten von Allen, Kirasic, Siegel & Herman (1979). In einer Dia-Show bestehend aus 52 Bildern zeigten sie Schülern der fünften Klasse einen "simulierten" Spaziergang durch ein Stadtgebiet. Nach der Präsentation wurden die Schüler in zwei Gruppen aufgeteilt. Beide Gruppen mussten die Entfernungen von Plätzen, die auf zwei Bildern dargestellt wurden, schätzen. Während die eine Gruppe Plätze mit einem sogenannten hohen Landmarkenpotential präsentiert bekam, wurden in der anderen Gruppe Plätze mit geringem Landmarkenpotential³³ verwendet. Die Entfernungsschätzungen³³ der Gruppe, deren Plätze ein hohes Landmarkenpotential aufwiesen, waren wesentlich genauer als jene der anderen Gruppe.

Obwohl wir erwartet hatten, dass die Zunahme der Größe des Gesichtsfeldes in den Bedingungen VW 2 - VW 4 zu einer Verbesserung der Genauigkeit der Entfernungs- und Richtungsschätzungen führt, konnten wir keinen derartigen Effekt in unseren Ergebnissen beobachten. Dies ist etwas überraschend, da eine frühere Arbeit (Alfano, Michel, 1990) gefunden hatte, dass die Leistung und Genauigkeit von Versuchspersonen in Aufgaben, die einerseits die Bildung einer kognitiven Karte und

³³ Die in unserem Experiment verwendete Waldlandschaft bietet nur ein geringes Landmarkenpotential.

andererseits die Koordination von Auge und Hand untersuchten, bei zunehmendem Gesichtsfeld zunahm. Allerdings beobachteten Alfano et al. den stärksten Effekt auf die Verhaltensleistung der Versuchspersonen bei einer Änderung der Größe des Gesichtsfeldes von 9° nach 14°, also einer Größe des Gesichtsfeldes, die noch weit unterhalb jener der ersten Generation unserer Simulationsanlage (50x40°) lag.

Die Verwendung des VR-Fahrrades als Interaktionsgerät führt bei der Schätzungen der Luftlinienentfernung und mit Einschränkungen auch bei der Schätzung der Länge der zurückgelegten Wegstrecke zu einer Verbesserung der Genauigkeit. Etwas unerwartet ist der Befund, dass sich aktive Bewegung stärker auf die Genauigkeit der Schätzungen der Luftlinienentfernung als auf die Genauigkeit der Schätzungen der Länge der zurückgelegten Wegstrecke auswirkt. Okabe, Aoki & Hamamoto (1986) haben bei Entfernungsschätzungen in der natürlichen Umwelt festgestellt, dass sowohl Anstiege als auch Gefälle beim Gehen zu einem Überschätzen der Entfernung führt. Bei der Frage nach dem Einfluss von Aktivität und Anstrengung auf das Schätzen der Entfernung ist es im allgemeinen erfolgversprechender nicht nach dem absoluten Wert der Genauigkeit, sondern nach der Änderung der Genauigkeit in Abhängigkeit vom Aktivitätsgrad der Versuchsperson zu fragen.

Das generelle Unterschätzen der Luftlinienentfernungen in den Bedingungen VW 1-3 bestätigt die Ergebnisse anderer Untersuchungen (Henry, 1992). Während die Größe des Gesichtsfeldes keinen Einfluss auf die Genauigkeit (vorzeichen-unbehafteter Fehler) der Entfernungsschätzungen hat, so zeigt sich bei der Betrachtung des vorzeichenbehafteten Fehlers bei der Schätzung der Länge des zurückgelegten Weges ein Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes. Bei einem kleinem Gesichtsfeld Unterschätzen die Versuchspersonen die Länge der Wegstrecke, dagegen Überschätzen sie die Länge, wenn ihnen ein größeres Gesichtsfeld zur Verfügung steht. Wir nehmen an, dass bei zunehmender Größe des Gesichtsfeldes eine Zunahme an optischer Flussinformation für den beobachteten Unterschied verantwortlich ist.

Im Gegensatz zu den Entfernungsschätzungen fanden wir keine Verbesserung der Genauigkeit der Richtungsschätzungen bei Verwendung des VR-Fahrrades. Chance, Gaunet, Beall & Loomis (1998) fanden in diesem Zusammenhang Hinweise, dass die Genauigkeit der Schätzung einer simulierten Richtungsänderung in der virtuellen Welt am Besten ist, wenn die Versuchspersonen die Bewegung gleichzeitig selbst durchführten. Dieses Ergebnis würde, sofern es Signifikanzniveau erreicht hätte, auf eine Beteiligung des vestibulären Systems bei der Bildung einer Repräsentation der räumlichen Struktur hinweisen. Die durch das Fahrrad erzeugte vestibuläre Stimulation beschränkt sich auf das Kippen beim Lenkvorgang. Drehungen entlang der Hochachse, wie sie unter diesen Bedingungen erforderlich wären, können mit dem VR-Fahrrad nicht durchgeführt werden.

8.7.3.2 *Schlussfolgerungen*

Die Ergebnisse vergleichender Untersuchungen des Navigationsverhaltens des Menschen in der virtuellen und der realen Welt eignen sich sowohl in der Grundlagenforschung als auch zur Optimierung der Qualität virtueller Welten. Dem Grundlagenforscher ermöglichen die vergleichenden Experimente die Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Experimenten, die in der virtuellen Welt durchgeführt wurden.

In unserem Experiment konnten wir zeigen, dass die Genauigkeit der Schätzungen von Richtungen und Entfernungen in der natürlichen Umwelt im allgemeinen etwas besser ist als in der virtuellen Welt. Allerdings sind die Unterschiede zwischen der virtuellen und der realen Welt nicht so drastisch, dass man befürchten müsste, die Ergebnisse von weiterführenden Navigationsexperimenten in unserer Simulationsumgebung könnten nicht zur Erklärung von menschlichen Verhalten in der realen Welt herangezogen werden.

Die unterschiedlichen, in unserem Experiment getesteten Bedingungen, weisen auf den nächsten zu tätigen Schritt hin. Sofern sich Unterschiede des Navigationsverhalten in den beiden Umwelttypen finden, erleichtert die Modularität und Flexibilität virtueller Welten dem Grundlagenforscher die Suche nach den Ursachen, wobei diese von der Frage „Welche relevanten Informationen fehlen in der virtuellen Welt oder welche Informationen werden fehlerhaft vermittelt?“ bestimmt wird. Die Bearbeitung dieser Frage ermöglicht ihrerseits interessante Einsichten in das Navigationsverhalten des Menschen.

Für den Entwickler virtueller Welten stellt das in der realen Welt beobachtete Verhalten einen Richtwert dar, den es gilt, in der virtuellen Welt zu erreichen. Entscheidend ist, dass ein valider Referenzwert nur durch die parallele Durchführung von Experimenten in der realen und virtuellen Welt erhalten werden kann. Sofern sich die Simulationsteilnehmer in der virtuellen Welt anders verhalten als erwartet, bietet eine Kombination aus Technologiekenntnissen und Wissen über die Wahrnehmung und das Verhalten des Menschen die ideale Kombination um die Qualität der virtuellen Welt gezielt verbessern zu können.

9 Zusammenfassung

Ein besonderes Kennzeichen neuer Methoden der Informationstechnologie ist der quasi-reale Charakter ihrer Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die unter dem Begriff „*Virtual Reality*“ zusammengefassten Anwendungen erlauben eine Echtzeit-Interaktion des Menschen mit real erscheinenden künstlichen Welten. Die Möglichkeit auch komplexeste Zusammenhänge innerhalb einer Laborumgebung untersuchen zu können, kann zu einer Reduktion der Kosten in unterschiedlichsten Fachbereichen (Fahr- und Flug-Training, Erwerb räumlichen Wissens, Prozessvisualisierung, etc.) beitragen.

Aufgrund ihrer Eigenschaften stellen virtuelle Welten ein besonders wertvolles Werkzeug bei der Untersuchung komplexer Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen des Menschen dar. Durch die Verwendung traditioneller Versuchsumgebungen war eine Charakterisierung der grundlegenden Vorgänge und Eigenschaften der Wahrnehmung und des Verhaltens unter reduzierten und isolierten Bedingungen möglich. In der natürlichen Umgebung wird die Informationsverarbeitung des Menschen allerdings durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Unter diesen Bedingungen ist eine zielgerichtete Auswertung relevanter Informationen nur unter Verwendung von Vorwissen über die Eigenschaften unserer Umwelt möglich. Folglich können wir unter ökologisch relevanten Bedingungen nur dann eindeutige Aussagen über die Informationsverarbeitung des Menschen machen, wenn die Versuchsumgebung eine hinreichend genaue Nachbildung der vielfältigen Bedingungen der natürlichen Umgebung bietet. Hier zeichnen sich virtuelle Welten im Vergleich zur natürlichen Umgebung durch die einfache Durchführbarkeit von Manipulationen sowie durch die gute Kontrolle der experimentellen Bedingungen aus.

Erkenntnisse und Methoden der Wahrnehmungs- und Verhaltensforschung ermöglichen im Gegenzug eine gezielte Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten an die Bedürfnisse des Wahrnehmungs- und Verhaltensapparates des Menschen. Bis dato haben sich Weiterentwicklungen der Technologie zu sehr an den reinen Leistungsdaten und weniger an den Bedürfnissen des Wahrnehmungs- und Verhaltensapparates orientiert. Als Folge dieser Vorgehensweise sind bisher nur wenige VR-Anwendungen über den Status einer Demo- bzw. Show-Applikation hinaus gekommen. Eine systematische Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten würde zwar einen höheren Initialaufwand bedingen, würde aber gleichzeitig zu einer Vereinfachung der Implementierung von Simulationsanlagen in der Zukunft führen.

Eine Besonderheit virtueller Welten ist, dass man im gleichen Experiment Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung und Faktoren zur Verbesserung der Qualität virtueller Welten untersuchen kann. Kennt man erst die Grundlagen von Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen, ist es im nachfolgenden wesentlich einfacher bestimmte Aspekte der Simulation an die Bedürfnisse des Teilnehmers anzupassen. In vielen Fahrsimulatoren erweist sich beispielsweise das Unterschätzen der

Fahrgeschwindigkeit als problematisch. Die experimental-psychologische Grundlagenforschung bietet zwar Hinweise auf Faktoren, welche die Geschwindigkeitswahrnehmung bei der Bewegung einfacher 2D-Muster beeinflussen, jedoch existieren keine systematischen Untersuchungen zur Charakterisierung der Geschwindigkeitswahrnehmung bei der Eigenbewegung unter den ökologisch relevanten (3D) Bedingungen einer Fahrsituation. Wir haben in unseren Experimenten die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in einer Fahrsimulation untersucht und dabei gefunden, dass sich sowohl der Kontrast so wie die Verteilung der Ortsfrequenzen als auch die Größe des simulierten Gesichtsfeldes positiv auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit auswirken. Wir vermuten, dass sich der Einfluss dieser Eigenschaften der Szene in relativ früheren Stufen der Informationsverarbeitung manifestiert. Dagegen wirkt sich die Dichte von Objekten erst auf einer relativ späten Stufe der Verarbeitung auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung aus. Wir nehmen an, dass hier zunächst eine Segmentierung der Szene erfolgt, bevor es zur Bestimmung der Geschwindigkeit kommt.

Das Vorliegen zweier paralleler Kanäle, welche die Geschwindigkeitsinformation auf unterschiedlicher Basis verarbeiten, erscheint sinnvoll, denn so kann unter unterschiedlichsten Sichtbedingungen wie Sonnenschein, Regen, Schnee, Nebel und Nacht sowie bei unterschiedlichsten Konfigurationen der Szene wie sie z.B. in der freien Landschaft oder Innenstadt vorliegen, eine zufriedenstellende Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung erreicht werden.

Das Vorliegen mehrerer visueller Faktoren, welche die Wahrnehmung der Fahrgeschwindigkeit beeinflussen können, ist für Entwickler virtueller Welten ein unschätzbare Vorteil, da ihnen je nach Typ und Budget eines Fahrsimulationsprojektes mehrere Möglichkeiten offen stehen, um eine Verbesserung der Wahrnehmung der Fahrgeschwindigkeit zu erreichen.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zur Informationsverarbeitung bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit von bewegten Gegenständen betonen die Bedeutung der Verwendung von Vorwissen im Zusammenhang mit sogenannten integrierten Wahrnehmungsleistungen. Integriert deshalb, weil zur Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit (=km/h) eines Gegenstandes die Information über dessen Winkelgeschwindigkeit mit anderen Informationen wie z.B. der Größe und der Entfernung des Gegenstandes kombiniert werden muss. In unseren Experimenten haben wir unter realistisch erscheinenden Bedingungen den Einfluss einer Reihe von Tiefenhinweisen und deren Kombinationen auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit untersucht. Trotz zum Teil erheblicher Unterschiede im Informationsgehalt der Szene, waren die Versuchspersonen unter unterschiedlichsten Bedingungen in der Lage, die objektive Geschwindigkeit fahrender Autos, korrekt einzuschätzen. Nur Veränderungen der Größe der Fahrzeuge führten zu äußerst signifikanten Änderungen bei der Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit. Beim Einfluss der Größe muss man zwischen dem Einfluss der Größe per se – je größer ein Fahrzeug desto langsamer wird seine Bewegung wahrgenommen - und dem Einfluss von Vorwissen unterscheiden – ein Lkw wird als sich

schneller bewegend wahrgenommen als ein Auto gleicher physikalischer Größe. Das Lkw-Experiment verdeutlicht gleichzeitig die Vorzüge virtueller Welten bei Durchführung der Geschwindigkeitskonstanz-Experimente. In der natürlichen Umgebung wären derartige Veränderungen der Größe eines Fahrzeuges nicht zu erreichen gewesen. Vor allem die Berücksichtigung der Ergebnisse des Experimentes zur Untersuchung des Einflusses der Tiefenhinweise auf die Wahrnehmung der objektiven Geschwindigkeit ermöglichen eine Verbesserung statischer und dynamischer Aspekte der Raumwahrnehmung.

Abschließend haben wir am Beispiel eines Navigationsexperimentes die Bedeutung von Untersuchungen gezeigt, die menschliches Verhalten in der virtuellen und realen Welt vergleichen. Hinsichtlich der Anwendung virtueller Welten in der Wahrnehmungsforschung liegt die Bedeutung vergleichender Experimente in der Gewährleistung der Übertragbarkeit von Ergebnissen virtueller Welten zur Erklärung menschlichen Verhaltens in der natürlichen Umgebung. Das Durchführen von Verbesserungen der Qualität virtueller Welten vereinfacht sich, wenn man in der Lage ist, die Abweichung des Verhaltens eines Simulationsteilnehmers vom erwünschten Verhalten quantitativ und nicht nur qualitativ zu beschreiben. Eine quantitative Beschreibung der Abweichung ist aber nur bei Vorliegen eines Referenzwertes, wie er durch Experimente in der natürlichen Umgebung geboten wird, möglich.

Eine wichtige Erkenntnis, die wir im Rahmen dieser Arbeit vermitteln wollen ist, dass systematische Untersuchungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle virtueller Welten uns in Zukunft einerseits neue Einblicke in die Informationsverarbeitung des Menschen unter ökologisch relevanten Bedingungen ermöglichen werden. Andererseits können die Ergebnisse dieser Untersuchungen direkt zur Verbesserung der Qualität virtueller Welten eingesetzt werden.

Anhang A Aufbau der VR-Simulationsanlage

A.1 Einleitung

Im Verlauf dieser Arbeit wurden am Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik in Tübingen drei Generationen eines Fahrradsimulators aufgebaut. Die erste Generation der Simulationsanlage wurde 1994 implementiert, die zweite Generation 1996, die dritte Generation wurde schließlich 1997 in Betrieb genommen. Kennzeichnend für die erste Generation der Simulationsanlage war der vergleichsweise geringe Aufwand an Material und Kosten bei der Implementierung. Die in ersten Experimenten gewonnenen Erfahrungen, hinsichtlich der Eignung der Simulationsanlage zur Durchführung von biologisch-psychologisch motivierten Untersuchungen, wurden nachfolgend in die Planung und den Bau der zweiten bzw. dritten Generation der Simulationsanlage eingebracht. Die folgenden Abschnitte bieten eine ausführliche Beschreibung unserer Erfahrungen, aber auch Überlegungen, die entscheidenden Einfluss auf die Wahl der Komponenten und der Konfiguration des Simulators hatten.

Einige Betrachtungen haben sicherlich einen sehr stark spekulativen Charakter, dennoch stellen sie aus unserer Sicht einen sehr wichtigen Bestandteil dieser Arbeit dar. Viele Benutzer von High-End-Technologien übernehmen allzu oft Methoden, Komponenten und Konfigurationen von Vorarbeiten, ohne vorher deren Eignung zu hinterfragen. Unser Ziel ist es, den Leser auf einige Themen aufmerksam zu machen, die vorderhand bereits geklärt zu sein scheinen, die aber bei näherer Betrachtung eine Reihe von ungeklärten Fragestellungen offenbaren.

A.2 Erste Generation des Fahrradsimulators (1994)

Die erste Generation der Simulationsanlage (Abb. 55) setzte sich aus einem „virtuellem Fahrrad“ (VR-Fahrrad, von CyberGear™ und Tectrix™), einem Simulationsrechner (Silicon Graphics™ Onyx RealityEngine2 (Akeley, 1993), 4x150 Mhz R4400, 256 MB RAM, 1 Graphic Pipeline, 4xRM4, 4 MB TRAM) und einem flachen Projektionsschirm (250x200cm, Aufprojektion durch CRT-Projektor Sony VPH 1271 QM) zusammen.



Abb. 55 zeigt die wesentlichen Interaktionselemente (VR-Fahrrad, Projektionsschirm) der ersten Generation der Simulationsanlage.

A.3 Das VR-Fahrrad

A.3.1 Motivation – Warum ein Fahrrad als Interaktionsgerät ?

Ein Forschungsschwerpunkt unserer Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit der Untersuchung des menschlichen Navigations- und Orientierungsverhaltens in Großfeldumgebungen. Aus Gründen, die bereits zuvor (siehe Abschnitt 2.3) genauer diskutiert wurden eignen sich virtuelle Welten sehr gut als Versuchsumgebung zur Durchführung dieser Untersuchungen.

Die ersten Experimente zum Navigations- und Orientierungsverhalten wurden in ‚Hexatown‘ (Gillner, Mallot, 1998, siehe auch Kapitel 8) durchgeführt. Um eine bessere experimentelle Kontrolle über die Versuchsbedingungen zu gewährleisten, wurden dort die Interaktionsmöglichkeiten der Versuchspersonen weitgehendst eingeschränkt. Nur an vordefinierten Punkten konnten die Versuchspersonen entscheiden, ob sie sich um einen vordefinierten Winkel nach links oder rechts drehen oder vorwärts bewegen wollen. Die rotatorischen und translatorischen Bewegungen wurden durch einen Mausklick initialisiert, erfolgten dann aber ohne Zutun der Versuchsperson (Steck, Mallot, 1999). Aus ökologischer Sicht ist eine derartige Einschränkung der Interaktion in der heutigen Zeit nicht ungewöhnlich. Bei der Fortbewegung mit dem Bus, als Beifahrer im Auto oder bei Beförderung durch U- oder S-Bahn erfährt der Mensch seine Umwelt passiv, d.h. er hat mit Ausnahme von Kopf- und Augenbewegungen sowie kleinerer Körperbewegungen keine Möglichkeit den Informationsfluss aus der Umwelt zu steuern. Sowohl die Bewegungsrichtung als auch die Bewegungsgeschwindigkeit werden unter diesen Bedingungen vorgegeben.

Im Vergleich hierzu kann ein Fußgänger oder ein Radfahrer nahezu frei entscheiden, wohin und in gewissem Rahmen, mit welcher Geschwindigkeit er sich bewegt. Die Möglichkeit des aktiven, eigenständigen Beeinflussens der Umwelt bzw. der Veränderung der eigenen Position ist von Bedeutung, da bereits mehrere Untersuchungen zeigen konnten, dass sich bestimmte Aspekte der menschlichen Informationsverarbeitung unter aktiven und passiven Bedingungen unterscheiden (Gibson, 1962, Larish, Anderson, 1995). Bei Larish et al. waren die Vorhersagen der zukünftigen Position und Orientierung in einer Flugsimulation wesentlich genauer, wenn die Versuchspersonen die simulierte Fortbewegung selbst per Steuerknüppel bestimmen konnten. Man nimmt an, dass unter aktiven Bedingungen die enge Verbindung zwischen Planen, Handeln und Wahrnehmen für die im allgemeinen verbesserte Leistung der Versuchspersonen in Wahrnehmungsaufgaben verantwortlich ist (siehe auch Gibson 1962, 1966, 1979). Dies legt natürlich die Vermutung nahe, dass sich auch beim Navigationsverhalten die Art und Weise der Fortbewegung entsprechend auf die Informationsaufnahme und -verarbeitung sowie die Bildung und Struktur der Repräsentation der Umwelt (kognitive Karte) auswirkt. Welche Aspekte der Informationsverarbeitung beim Navigationsverhalten könnten nun möglicherweise durch den Fortbewegungsmodus (aktiv oder passiv) beeinflusst werden?

- Während ein Fußgänger erhebliche Anstrengungen aufbringen muss, um von Punkt A nach Punkt B zu gelangen, ist die Anstrengung bei einer Fahrt mit der Straßenbahn entlang der gleichen Strecke vergleichsweise gering. Da dem Fußgänger neben visuellen und propriozeptiven³⁴ auch Informationen über seinen Energieverbrauch (Muskelsäure, Atmung, etc.) zur Verfügung stehen, ist es wahrscheinlich, dass sich seine Einschätzung über die Länge der zurückgelegten Wegstrecke unter aktiven und passiven Bedingungen unterscheidet.
- Ähnliche Überlegungen spielen bei der Einschätzung der Richtung eine Rolle.
- Der Fußgänger hat ferner „Zeit und Muße“ zu jedem Zeitpunkt Halt zu machen, um sein Umfeld genauer zu betrachten. Somit bietet sich ihm die Möglichkeit seine lokale Umgebung genauer zu erforschen, womit sich zumindest Unterschiede in der Kenntnis der Landmarken ergeben sollten.

Eventuelle, unter aktiven und passiven Bedingungen auftretende Unterschiede in der Struktur kognitiver Karten sollten allerdings quantitativ und nicht qualitativ betrachtet werden. Beispielsweise ist zu erwarten, dass sich die Entfernungsschätzungen „aktiver“ und „passiver“ Versuchspersonen beim Überwinden eines Anstieges im Gelände unterscheiden. Die Einschätzung der Entfernung bei aktiver Fortbewegung wird jedoch nicht notwendigerweise genauer sein.

³⁴ „Unter Propriozeption (Tiefensensibilität, kinästhetische Sensibilität) verstehen wir die Wahrnehmung der Stellung und Bewegung unseres Körpers; die Propriozeption besitzt drei Qualitäten, nämlich Stellungs-, Bewegungs- und Kraftsinn.“ ... „Bei der Propriozeption wirkt eine Vielfalt von Mechanosensoren, z.B. aus Muskeln, Gelenken und Sehnen mit.“ (Schmidt, Thews, 1995)

In der Literatur finden sich einige Hinweise auf Unterschiede in der Einschätzung von Entfernungen in Abhängigkeit von der Anstrengung der Versuchsperson. Bei Okabe, Aoki, Hamamoto (1986) führen hügelige Strecken zu einem relativen Überschätzen der zurückgelegten Wegestrecke. Kosslyn, Pick & Fariello (1974) fassen den Einfluss der Anstrengung in allgemeiner Form zusammen. Sie behaupten, dass Entfernungsschätzungen generell mit dem zum Überwinden einer Strecke von A nach B benötigten Aufwand korrelieren („*functional distance*“). Während bei Kosslyn et al. der Aufwand im „Umlaufen“ eines undurchsichtigen Hindernisses bestand, mussten die Versuchspersonen bei Cohen, Baldwin & Sherman (1978) Gebäude und andere Hindernisse umlaufen und einige Hügel überwinden. In virtuellen Welten hat die Möglichkeit sich aktiv (und wirklich) fortbewegen zu können bei Verwendung eines Head-Mounted-Displays (HMD) zu einer allerdings nicht signifikanten Verbesserung der Genauigkeit der Einschätzung der Richtung geführt (Chance, Gaunet, Beall, Loomis, 1998). Eine eindeutige Klärung der Frage, inwieweit und unter welchen Bedingungen der Bewegungsmodus und das Profil des Terrains die Struktur kognitiver Karten beeinflussen, ist bis dato noch nicht gelungen. Die Durchführung von Experimenten zur Untersuchung dieser Fragestellung sollte durch die Verfügbarkeit virtueller Welten erleichtert werden, da eine Vielzahl von Interaktionsgeräten zur Verfügung steht, die ihrerseits wiederum eine genaue Kontrolle der Anstrengung der Versuchsperson erlauben.

Um in den Navigationsexperimenten unserer Arbeitsgruppe, vor allem den Einfluss propriozeptiver Informationen auf die Struktur kognitiver Karten untersuchen zu können, haben wir ein Interaktionsgerät gesucht, das die Versuchspersonen einerseits mit zusätzlichen Informationen über ihre Fortbewegung und andererseits mit Informationen über die Eigenschaften des Terrains versorgt. Hiermit ergab sich folgendes Anforderungsprofil an das gesuchte Interaktionsgerät:

- Die Bedienung und der Gebrauch des Interaktionsgerätes sollten möglichst einfach und intuitiv sein. Am Besten sollten die Versuchspersonen die Art und Weise der Interaktion bereits aus der natürlichen Umwelt bekannt sein. Auf diesem Wege würden langwierige Trainingssitzungen zum Erlernen des Gebrauchs des Gerätes vermieden werden.
- Den Versuchspersonen sollte es möglich sein, direkt von ihren Aktionen auf Richtungsänderungen und die in der virtuellen Welt zurückgelegte Entfernung zu schließen.
- Es sollte möglich sein, Eigenschaften des Terrains wie Steigungen und unterschiedliche Zusammensetzungen des Untergrundes in nicht-visueller Form darstellen zu können.
- Der Aufwand bei der Inbetriebnahme und Integration des Gerätes in das Gesamtsystem sollten sich in Grenzen halten.

In der natürlichen Umwelt herrschen mit dem Laufen und dem Radfahren zwei Arten der aktiven Fortbewegung vor.³⁵ Während sich zur Simulation des Radfahrens die Verwendung eines in der „Realität“ existierenden Gerätes anbietet, gibt es kein „natürliches Gerät“ zur Simulation des Laufens. Da eine Person beim Laufen in direkter Verbindung mit dem Terrain steht, kann die Simulation des Laufens im Labor nur durch eine simulierte Bewegung des Untergrundes erfolgen. Abgesehen von einigen wenigen Anwendungen (Roller-Skates - Iwata, 1990) wurde die Simulation eines bewegten Untergrundes durch Verwendung von Laufbändern vorgenommen. Diese haben jedoch, mit Ausnahme der 2D-Laufbänder (Darken, Carmein, 1997; Iwata, 1999), den Nachteil, dass zur Simulation von Richtungsänderungen eine nicht-natürliche Metapher (Knopfdruck, Bestimmung der Ausrichtung des Kopfes, Lenkhebel, etc.) verwendet werden muss. An der Universität von Northern Carolina wurde zur Navigation in Gebäuden ein Laufband mit einer Art Lenkstange - ähnlich der des Fahrrades - verwendet (Brooks, 1986). Ein ähnliches Verfahren fand auch an der Universität von Tokyo Anwendung (Hirose, Yokoyama, 1992). Am Advanced Telecommunications Research Institute (ATR) wurde die Problematik gelöst, indem das Laufband auf eine 3-Achs-Bewegungsplattform gestellt wurde (Noma, Myiasato, 1998).

Auch die Verwendung der 2D-Laufbänder ist nicht ganz unproblematisch. Die Bedienung des 2D-Laufbands von Darken et al. (1997) ist mit etlichen Unannehmlichkeiten (Geräuschpegel von 60 dB, Schutzgeschirr, Sicherheitsvorrichtung) verbunden. Die Sicherheitsvorrichtung besteht aus einem mechanischen Arm, der zur Stabilisierung des Simulationsteilnehmers dient, wodurch allerdings dessen Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt wird. Das 2D-Laufband von Iwata (1999) entspricht in seiner Funktionalität der Kramer-Kugel. Anstelle der Kugel werden hier zwölf motorgetriebene Laufbänder verwendet, die in Form eines Torus angeordnet sind. Sobald die Person einen bestimmten Bereich auf der Lauffläche verlässt, werden die einzelnen Laufbänder gezielt angesteuert, um die Person wieder in das Zentrum der Lauffläche zurück zu bringen. Die Bestimmung der relativen Position auf der Lauffläche erfolgt durch die Verwendung von zwei Polhemus-Sensoren, die an den Knien der Versuchsperson befestigt sind. Vorteil dieses Systems ist der Verzicht auf Vorkehrungen zur Stabilisierung der Person. Nachteilig ist – in der bestehenden Installation - die relativ kleine Lauffläche, welche die Benutzer dazu zwingt, kleine Schritte zu machen.

Die Eignung von Laufbändern zur Simulation der Fortbewegung in virtuellen Welten wurde von Singer, Allen, McDonald & Gildea (1997) sowie Witmer & Kline (1998) untersucht. Singer et al. haben in einem Navigationsexperiment die Qualität des räumlichen Wissens verglichen. In einer sogenannten „High-Fidelity-VR“- Bedingung erkundeten die Versuchspersonen die simulierte Landschaft durch Gehen auf dem Laufband bei gleichzeitiger Rückwirkung der gemessenen Kopfposition und –orientierung auf die visuelle Darstellung. In der „Low-Fidelity-VR“- Bedingung

³⁵ Weitere „Typen“ aktiver Fortbewegung kommen vor allem als Sportarten zum Tragen: Schwimmen, Rudern, etc. Wir wollen uns aber auf die Diskussion der aktiven Fortbewegungen im täglichen Leben beschränken.

saßen die Versuchspersonen auf einem Stuhl und konnten sich mittels eines Joysticks in der virtuellen Welt fortbewegen. Die Kopfposition und –orientierung wurde nicht gemessen. Die Versuchspersonen der „High-Fidelity-VR“- Bedingung zeigen ein klar besseres räumliches Wissen hinsichtlich der Kenntnis der Landmarken und deren relativer Orientierung. Kein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden Versuchsbedingungen zeigte sich für die „projektive Konvergenz (Siegal, 1981)“.³⁶ Zwar bestimmen Versuchspersonen der „High-Fidelity-VR“- Bedingung die Position von Orten in einem der getesteten Terrains genauer, im anderem Terrain ließ sich jedoch kein eindeutiger Unterschied zwischen den beiden Versuchsbedingungen feststellen. Witmer et al. (1998) konnten in vergleichenden Experimenten (real und virtuell) keinen positiven Einfluss der Bewegung auf einem Laufband auf die Genauigkeit von Entfernungsschätzungen in virtuellen Welten feststellen.

Die genannten Einschränkungen der Laufbänder sowie die Tatsache, dass das Gehen auf Laufbändern von vielen Personen als schwierig empfunden wird, waren letztendlich ausschlaggebend für unsere Entscheidung ein Fahrrad anstelle eines Laufbandes zu verwenden. Während der Planung der ersten Generation unserer Simulationsanlage brachten Tectrix™ und CyberGear™ (1995) ein sogenanntes VR-Fahrrad auf dem Markt, dessen eigentlicher Verwendungszweck darin bestand, Ausdauer-Training in Fitness-Studios anregender zu gestalten. Im Vergleich zur Verwendung der Laufbänder bringt die Verwendung des VR-Fahrrades keine einschränkenden Sicherheitsbestimmungen mit sich. Die Simulation des Fahrrades kann am „realem“ Gerät durchgeführt werden, während beim Laufen eine Simulation der Bewegung des Untergrundes erfolgen muss.

A.3.2 Beschreibung des VR-Fahrrades

In seiner Form ähnelt das VR-Fahrrad einem Liegefahrrad (Abb. 56). Es besteht aus zwei Bauteilen, dem Rahmen und dem eigentlichen Fahrrad. Die Verbindung zwischen den beiden Bauteilen erfolgt durch zwei Aufhängungen am vorderen und hinterem Ende des Fahrrades. Damit das „virtuelle Fahrradfahren“ zu einem möglichst realistischen Erlebnis wird, haben die Entwickler besonderen Wert auf die Implementierung des „Tretens“ und des „Lenkens“ gelegt.

³⁶ Zur Bestimmung der projektiven Konvergenz schätzen Versuchspersonen die Entfernung und Richtung eines Platzes von drei unterschiedlichen Orten aus. Die sich hieraus ergebenden geschätzten Positionen des Platzes bilden ein Dreieck. Die Entfernung zwischen dem Schwerpunkt des Dreiecks und der tatsächlichen Position des Platzes ist dann ein Maß für die Genauigkeit des räumlichen Wissens.

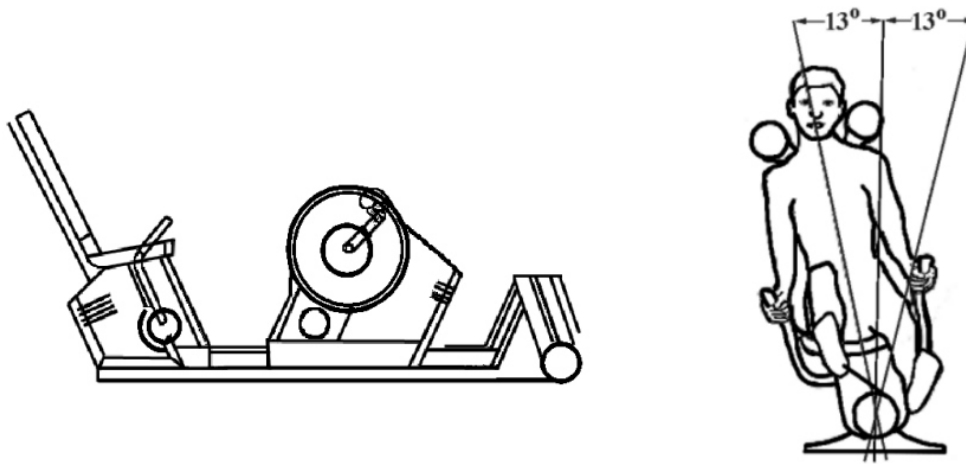


Abb. 56 Schematische Darstellung des VR-Fahrrades. Der linke Teil der Abbildung zeigt das Fahrrad in einer Seitenansicht, während rechts das Fahrrad samt Simulationsteilnehmer in einer Frontsicht dargestellt ist. Die rechte Abbildung verdeutlicht, dass Lenkbewegungen des Simulationsteilnehmers zu einer Kippbewegung des Fahrrades entlang seiner Längsachse führen.

Gelenkt wird das VR-Fahrrad durch zwei Hebel, die sich links und rechts des Sitzes befinden. Zum Fahren einer Linkskurve muss der Benutzer den rechten Hebel nach vorne drücken und den linken Hebel nach hinten ziehen. Die beiden Hebel sind miteinander gekoppelt, so dass die Bewegung eines Hebels sich mit entgegengesetzten Vorzeichen auf den gegenüberliegenden Hebel überträgt. Des Weiteren sind die beiden Hebel noch durch zwei Seilzüge mit dem Rahmen verbunden, womit eine Lenkbewegung gleichzeitig zu einer Kippbewegung des Fahrrades entlang seiner Längsachse führt (Abb. 56, rechts). Die Größe der Lenkbewegung wird durch einen optischen Aufnehmer bestimmt und als elektrisches Signal an einen Kontrollrechner (PC) weitergeleitet.

Die Pedale des Fahrrades sind an ein Schwungrad gekoppelt, welches wiederum über einen Keilriemen mit einem zweiten Schwungrad verbunden ist. Durch die Verwendung der Schwungräder wird eine Simulation der beim „realen“ Fahrradfahren auftretenden Trägheitskräfte erreicht. Um das Fahren auf Untergründen mit unterschiedlichsten Reibungskoeffizienten (Straße, Feldweg, Wiese, etc.) sowie das Fahren bergauf und bergab möglichst naturgetreu simulieren zu können, ist ein zweiter Keilriemen mit dem ersten Schwungrad verbunden. Die Spannung dieses zweiten Keilriemens wird durch einen DC-Motor kontrolliert. Die Ansteuerung des Motors und somit die Kontrolle des Tretwiderstandes erfolgt vom PC aus. Die Bestimmung der Trittfrequenz und –geschwindigkeit erfolgt, wie die Messung der Größe der Lenkbewegung durch Verwenden eines optischen Aufnehmers.

Auf jeden Hebel befinden sich je drei Druckknöpfe. Die Funktion der Druckknöpfe ist frei programmierbar. In den meisten Fällen wurden drei der Tasten mit einer „virtuellen Gangschaltung“ und einer Handbremse belegt. Den verbleibenden Tasten können in Experimenten je nach Bedarf bestimmte Funktionen zugewiesen werden.

A.3.3 Allgemeine Betrachtung

Im technisch-logistischen Sinne handelt es sich bei dem VR-Fahrrad sowohl um ein Eingabe- als auch ein Ausgabegerät (Bülthoff, Van Veen, 1999). Die Trittfrequenz, der Lenkwinkel und die Drucktasten fungieren als Eingabegeräte in die Simulation, der einstellbare Tretwiderstand und die Kippbewegung beim Lenken sind als Ausgabegeräte der Simulation zu sehen. Bemerkenswert ist, dass die Kontrolle der Kippbewegung auf einer direkten mechanischen Koppelung beruht, während das Einstellen des Tretwiderstandes in einer langen und somit latenzbehafteten Schleife erfolgt.

Obwohl der Gebrauch von Liegefahrrädern nicht sehr weit verbreitet ist, bestätigen uns alle Versuchspersonen, dass zur Benutzung des Fahrrades keine Gewöhnungsphase notwendig ist. Insgesamt gesehen, scheint ein Liegefahrrad für die Verwendung in einem Simulator geeigneter als ein handelsübliches Fahrrad, da sein tiefliegender Schwerpunkt dem System zusätzliche Stabilität verleiht.

Bei Fortbewegungen in simulierten Großfeldumgebungen bietet das Fahrrad im Vergleich zur Computermaus, dem Spaceball oder ähnlichen Eingabegeräten einen vertrauten Zugang zur Bewertung der zurückgelegten Entfernung und zur Bestimmung von Richtungsänderungen. Ein weiterer Vorteil eines vertrauten Eingabegerätes könnte darin liegen, dass die zur Bedienung des Gerätes notwendige Informationsverarbeitung relativ wenig Zeit in Anspruch nimmt. In der zusätzlich verbleibenden Zeit können sich die Simulationsteilnehmer auf die Verarbeitung von Informationen aus der (simulierten) Umwelt konzentrieren. Sofern die Freiheitsgrade der Computer-Maus nicht wie in „Hexatown“ stark eingeschränkt sind, haben auch erfahrene Benutzer bei Verwendung von Computer-Mäusen häufig Schwierigkeiten sich gezielt in virtuellen Welten fortzubewegen bzw. die Benutzer müssen sich sehr stark auf eine adäquate Bedienung der Maus konzentrieren. Unter diesen Bedingungen verbleibt dann weniger Zeit, sich auf die eigentliche Struktur der simulierten Großfeldumgebung zu konzentrieren.

Das VR-Fahrrad erfüllt somit im wesentlichen unsere zuvor beschriebenen Anforderungen an ein Interaktionsgerät zur Untersuchung des Einflusses propriozeptiver Faktoren auf das Navigationsverhalten. Zusammenfassend handelt es sich um folgende Eigenschaften:

- Es ist einfach zu benutzen.
- Es werden natürliche Metaphern zur Fortbewegung in der virtuellen Welt verwendet.
- Neben der visuellen Information stehen den Versuchspersonen nun auch propriozeptive sowie Information über ihren Energieverbrauch während der Fortbewegung zur Verfügung.
- Die Integration des VR-Fahrrades in eine bestehende Simulationsanlage ist problemlos.

A.3.4 Anforderungen von Experimenten zur Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung

In der ursprünglichen Implementierung des Fahrrads erfolgte die komplette Berechnung der Simulation (Dynamik, Graphik, Audio) sowie das gesamte Input-/Output-Handling auf einem 80486er PC mit einer Taktfrequenz des Prozessors von 50 Mhz (Distler, 1996). Die Szene wurde auf einem CRT-Monitor dargestellt, der am vorderen Ende des Fahrrades auf einem Sockel montiert war.³⁷

Verschiedene Einschränkung des Fahrrades in seiner ursprünglichen Konfiguration machten es unserer Meinung nach eher ungeeignet zur Verwendung in Untersuchungen der menschlichen Wahrnehmung. Die wichtigsten Einschränkungen waren:

- die geringe Bildwiederholrate von 5-8 Hz
- die geringe Auflösung der Darstellung von 640x480 Pixel
- die geringe Größe des Gesichtsfeldes (20x15°)
- die geringe Entfernung der Far-Clipping Plane (dies führt dazu, dass Objekte plötzlich in die Szene eintreten)

Die Bewertung der Einschränkungen erfolgte vor allem hinsichtlich der geplanten Verwendung der Simulationsanlage in Navigationsexperimenten. Die geringe Größe des Gesichtsfeldes beschränkt den überschaubaren Bereich der Szene und kann damit möglicherweise zu einer Fehleinschätzung von Entfernungen (s.u.) sowie zu Einschränkungen bei der Bildung von Übersichtswissen führen. Obwohl es in der Literatur Hinweise gibt, dass bestimmte Aufgaben wie das Greifen und Manipulieren virtueller Objekte auch sehr gut bei vergleichsweise geringen Auflösungen durchgeführt werden können (Smets, Overbeke, 1995), so scheint doch bei anderen Aufgaben (Szenenerkennung, Navigation) eine verbesserte Auflösung von Vorteil.

Geringe räumliche Auflösungen der visuellen Darstellung führen in Simulationsumgebungen im allgemeinen zur Fehleinschätzung der Distanz weit entfernter Objekte. Warum ist dies so? In der natürlichen Umgebung wird die Wahrnehmung der Entfernung von Objekten durch eine Vielzahl von Faktoren wie Schattierung, Texturgradient, Verdeckung, Bewegunsparrallaxe und stereoskopische Disparität bestimmt (zur Übersicht siehe Sedgwick, 1986. Wenn in einer Szene mehrere Tiefenhinweise zur gleichen Zeit verfügbar sind – was in den meisten Fällen zutrifft – werden diese durch das visuelle System des Menschen integriert (Bülthoff, Mallot, 1988). Zwar wurden bereits verschiedene Modellverstellung zur Beschreibung der Informationsverarbeitung bei der Integration vorgeschlagen (Bülthoff, Yuille, 1991; Doshier, Sperling, Wurst, 1986; Landy, Maloney, Johnston, Young, 1995), das Thema der Integration ist aber nach wie vor Gegenstand der Forschung.

Hinsichtlich welcher Aspekte unterscheidet sich nun Entfernungswahrnehmung in der realen und der virtuellen Welt? In der Computer-Graphik wird eine 3D-Welt mittels perspektivischer Projektion

³⁷ In Abb. 56.(links) sind am vorderen Ende des Fahrrades die Reste des Sockels erkennbar.

auf einer 2D-Oberfläche (Projektionsebene) dargestellt. Aus diesem Grund kommt es bei geringer Auflösung der Graphik zu einer Unterabtastung der Szene. Gerade Eigenschaften wie Schattierung und Texturgradient profitieren aber von einer höheren Auflösung der Graphik. Wo in der natürlichen Umwelt die Struktur einer Oberfläche noch gut erkennbar ist, ergibt sich in der Computer-Graphik eine undeutliche, „verwaschen erscheinende“ Darstellung der Szene. Benachbarte Objekte, die in der natürlichen Umgebung leicht als einzelne Objekte zu erkennen sind, werden in der Computer-Graphik schon in relativ geringen Entfernungen als ein Objekt dargestellt, welches zudem nicht mehr eindeutig identifizierbar ist. Die Identifizierbarkeit von Objekten leidet im allgemeinen unter einer geringen Auflösung der Graphik, da entfernte Objekte nur mit wenigen Pixeln dargestellt werden. Da die Größe bekannter Objekte – vor allem bei größeren Entfernungen - ein sehr zuverlässiger Hinweis auf Ihre Entfernung ist, steigt mit dem Wegfall dieser Information die Wahrscheinlichkeit, dass die Entfernung von Objekten falsch eingeschätzt wird. Auch ist bei geringen Auflösungen für den Beobachter bei weiter entfernten Objekten schwierig zu erkennen, welches Objekt von welchem Objekt verdeckt wird. Zwar handelt es sich bei der Tiefenwahrnehmung aufgrund der Integration mehrerer Informationen um einen fehlertoleranten Prozess, da eine geringe Auflösung jedoch zu einer Vielzahl konsistenter Effekte führt, kommt es letztendlich zu einer Verfälschung der Tiefenwahrnehmung. Eine verbesserte Auflösung der Graphik wirkt sich also nicht nur über einen, sondern über mehrere Faktoren positiv auf die Wahrnehmung von Entfernungen aus.

Inzwischen (1999) können auch bei Verwendung von PCs hohe räumliche Auflösungen (1280x1024 Pixel) erreicht werden. Zur Zeit der Erst-Installation des Fahrrad-Simulators (1994) war jedoch die Auflösung von PC-Graphiken beschränkt (640x480 Pixel). Erst durch Verwendung eines vergleichsweise teuren Graphikrechners (Silicon Graphics™ Onyx RealityEngine2) konnten wir die damaligen Beschränkungen der Auflösung überwinden. Die Auflösung der Computer-Graphik ist jedoch nicht der einzig limitierende Faktor bei der Darstellung von detailreichen Szenen. In der Echtzeit-Simulation virtueller Welten wird die Darstellung detaillierter Oberflächenstrukturen durch die Verwendung einer geringen Zahl texturierter Polygone und nicht durch Verwendung rechenintensiver Beleuchtungsverfahren bei Vorliegen einer großen Zahl von Polygonen (Ray-Tracing, Radiosity-Rendering) erreicht. Zum Beschleunigen des „Texturierens“ wird dieser Vorgang auf Hardware-Basis (Hardware-Texture-Mapping, Heckbert, 1989; Haeberli, Segal, 1993) durchgeführt. Dazu werden die Texturen in einem speziellen Textur-Speicher auf der Graphikkarte abgelegt, womit die Größe des Textur-Speichers der begrenzende Faktor bei der Darstellung von Detailstrukturen ist. Zwar haben sich inzwischen Verfahren wie Detailtexturen und Texture-Paging etabliert,³⁸ die Implementierung dieser Verfahren ist aber vergleichsweise schwierig und führt häufig

³⁸ Detailtexturen stellen ein Level-of-Detail-Verfahren auf Textur-Basis dar. Texture-Paging erlaubt den schnellen Transfer von Texturen aus dem Hauptspeicher in den Texturspeicher.

zu Einbußen oder Unstetigkeiten in der Leistungsfähigkeit der Simulation.

Wir wollen in diesem Zusammenhang auch darauf hinweisen, dass sich die Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing bei kontrastreichen Objekten negativ auf die Wahrnehmung von deren simulierter Entfernung auswirkt. Anti-Aliasing führt besonders bei weit entfernten Objekten zu einem verwischten Erscheinungsbild, was dazu führt, dass das Objekt größer eingeschätzt wird als es wirklich ist. Die Verwendung von Full-Scene-Anti-Aliasing „verschönt“ zwar somit das Erscheinungsbild der Szene, aber bei der Wahrnehmung von Entfernungen führt die Verwendung auch zum Auftreten nachteiliger Nebeneffekte (vergleiche hierzu auch die Experimente zur Wahrnehmung der Geschwindigkeit der Eigenbewegung in Kapitel 6).

Bei den bisher diskutierten Tiefenhinweisen handelt es sich um sogenannte bildbasierte Reize. Eine weitere Möglichkeit die Wahrnehmung von Entfernungen zu verbessern ist die Verwendung stereoskopischer Methoden (zur Übersicht siehe McKenna, Zeltzer, 1992). Brillen für aktive oder passive Stereodarstellung auf Monitoren und Projektoren sowie Head-Mounted-Displays (HMD) stellen hier die am häufigsten verwendeten Technologien dar. Allerdings spricht bei vielen Anwendungen eine Reihe von Faktoren gegen eine Verwendung von Stereoverfahren. Vor allem bei der Verwendung von HMDs wurden starke Verzerrungen der wahrgenommenen Entfernung und Störungen des fein abgestimmten Akkomodation-Vergenz-Systems festgestellt (Edgar, Bex, 1995, Mon-Williams, Rushton, Wann, 1996). Weitere Neben- und Nachwirkungen von HMDs beinhalten unscharfes Sehen, Augenschmerzen, Doppelbilder und ein Veränderung des Fokuspunktes im Dunklen (Mon-Williams, Wann, Rushton, 1993; Rushton, Mon-Williams, Wann, 1994; Peli, 1995). HMDs sind des weiteren unangenehm zu tragen und, bei Kopfbewegungen kommt es unabhängig von der Qualität der Feststelleinrichtung zu relativen Bewegungen zwischen HMD und Kopf.

Im Vergleich zur stereoskopischen Darstellung stellt die Bewegungsparallaxe gerade bei größeren Entfernungen einen sehr starken Tiefenhinweis dar. Eine Verbesserung der Qualität der simulierten Bewegungsparallaxe kann sowohl durch eine Zunahme der räumlichen als auch der zeitlichen Auflösung (Bildwiederholrate) der Simulation erreicht werden.

A.3.5 Modifikationen des Aufbaus des VR-Fahrrades

Um die Eignung des VR-Fahrrades zur Verwendung in Untersuchungen mit experimental-psychologischen Fragestellungen zu verbessern, haben wir eine Reihe von Modifikationen zur Aufhebung der im vorangehenden Abschnitt diskutierten Beschränkungen durchgeführt. Das Erzeugen der Szene erfolgte nicht länger auf dem PC, sondern auf einer Silicon Graphics™ Onyx RealityEngine2 (mit Hardware-Texture-Mapping). Die Auflösung der dargestellten Szene erhöhte sich durch Verwendung dieses Rechners auf 1280x1024 Pixel. Ferner betrug die Bildwiederholrate je nach Komplexität der dargestellten Szene 30 bzw. 60 Hz. Der Monitor wurde durch einen Projektionsschirm (+Projektor, Gesichtsfeld 50x40°) ersetzt. Des weiteren wurden nun ein Grossteil

der Berechnungen der Dynamik des Fahrrades (Abschnitt A.3.6) auf der Silicon Graphics™ und nicht auf dem PC durchgeführt. Dessen Funktion beschränkte sich in der neuen Installation auf den Betrieb der Schnittstellen zum Fahrrad und zum Silicon Graphics™-Rechner (RS232-Protokoll).

Die Modifikationen waren so ausgelegt, dass eine signifikante Verbesserung einiger Eigenschaften des Simulators erreicht werden konnte, ohne dabei jedoch einen bestimmten finanziellen und logistischen Rahmen zu sprengen. Später wird sich zeigen, dass die Betreuung eines komplexen Simulators sehr schnell zu einem aufwendigen Unterfangen wird. Im weiteren Verlauf galt es mit diesem ersten Aufbau Erfahrungen in Vor-Experimenten zu sammeln, wobei diese einerseits dazu dienten, die Durchführbarkeit spezifischer experimenteller Fragestellungen zu testen und andererseits sollte sich zeigen, welche Aspekte der Simulationsanlage zusätzlicher Erweiterungen bedurften.

A.3.6 Berechnung der Position und der Orientierung des Fahrrad-Fahrers

Eine realistische Simulation des dynamischen Verhaltens des Fahrrades wird durch die Implementierung einer vereinfachten „Fahrdynamik“ erreicht. Im Rahmen des verwendeten physikalischen Modells des Fahrrades (Sharp, 1979) wird in jedem Zeitschritt der Simulation die Position und Orientierung des Radfahrers in der virtuellen Welt unter Berücksichtigung folgender Parameter berechnet:

- „alte“ Position und Orientierung des Radfahrers
- Lenkwinkel
- Tretgeschwindigkeit
- Neigungswinkel des Terrains in der virtuellen Welt
- Reibungskoeffizient des Terrains an der aktuellen Position
- Masse (Fahrrad & Fahrradfahrer)
- Die Entfernung zwischen dem (punktförmigen) Auflagepunkten des Vorder- und Hinterrades
- Die relative Position des Augenpunktes zwischen Vorder- und Hinterrad
- Augenhöhe des Fahrradfahrers (Grundhöhe ist Höhe der Ebene auf der das Fahrrad steht)
- Ein Faktor, der den Zusammenhang zwischen einer Pedalumdrehung und der zurückgelegten Entfernung beschreibt. Dieser Faktor bezieht den gegenwärtig gewählten Gang in die Simulation ein.
- Windgeschwindigkeit und -richtung
- Schwerkraft
- Höhe des Terrains in den Zeitschritten t und $t-1$
- Kinetische Energie des Fahrrades zum Zeitpunkt $t-1$

Mit Hilfe der oben genannten Parameter wird eine Reihe von Kräften und Energien (potentielle Energie, Windkräfte, Reibungskräfte, durch die Aktionen des Fahrradfahrers eingebrachte Energie)

berechnet. Die einzelnen Kräfte werden schließlich addiert, um so die kinetische Energie des Fahrrades und somit seine Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t zu erhalten. Die neue Position und Orientierung des Fahrradfahrers wird durch die Verrechnung von Geschwindigkeit und Ausrichtung des Fahrrades (+Lenkwinkel) erhalten. Am einfachsten nachvollziehen lässt sich der Einfluss der Dynamik-Simulation bei Fahrten bergauf und bergab. Während eine Fahrt bergab kaum eigener Anstrengungen bedarf, bleibt das Fahrrad bergauf ohne kontinuierliche Zufuhr von Energie sehr schnell stehen.

A.3.7 Weiterführende Betrachtungen zur Fahrdynamik

Durch das Hinzufügen weiterer Parameter wäre es sicherlich möglich gewesen, die Qualität der dynamischen Simulation zu verbessern. Weitere Verbesserung würden erreicht, indem die Frequenz der Berechnung der Fahrdynamik unabhängig von der Bildwiederholrate der visuellen Simulation mit einer höheren Taktrate durchgeführt wird.

Im Vergleich zur Simulation vergleichsweise „schwerer“ Vehikel (z.B. Auto) ermöglicht die geringe Masse des Fahrrades das Auftreten hoher Beschleunigungen und erschwert somit die Simulation seiner Dynamik in VR-Umgebungen. Aufgrund der geringen Bildwiederholrate der Computer-Graphik können hohe Beschleunigungen beim VR-Fahrrades höchstens in Form des Tretwiderstandes, nicht aber in Form der visuellen Darstellung vermittelt werden. In der Dynamik-Simulation des VR-Fahrrades fehlen eine ganze Reihe von Kräften die normalerweise während des Fahrradfahrens auf den Körper einwirken (Zentrifugalkräfte, Corioliskräfte). Gerade die Berechnung dieser Kräfte hätte sicherlich einer hohen Wiederholrate und der Berücksichtigung hoher Beschleunigungen bedurft. Da diese Kräfte im Simulator nicht „darstellbar“ sind und die Benutzer des VR-Fahrrades die dynamischen Eigenschaften der Simulation als zufriedenstellend einstufen, haben wir uns entschlossen auf eine höhere Wiederholrate der Dynamik-Simulation zu verzichten.

Ein Problem des Fahrrades ist sicherlich das Fehlen mechanischer Bremsen. Obwohl physikalisch eindeutig definiert, gestaltet sich die Simulation des Bremsvorganges schwierig. Der Keilriemen zur Regulation des Tretwiderstandes erlaubt nur eine Kontrolle des Widerstandes bei einer Vorwärtsbewegung. Die Kombination der Schwungräder stellt den einzigen Widerstand beim Rückwärtstreten dar. Somit ist die Simulation einer Rücktrittbremse nicht möglich. Deshalb waren wir gezwungen die Simulation der Bremsbewegung durch einen (digitalen) Tastendruck (=Bremsen ein oder aus) vorzunehmen.

A.3.8 Vestibuläre Informationen

Beim VR-Fahrrad handelt es sich mit Ausnahme der Kippbewegung beim Lenken um eine statische Installation. Man muss sich fragen, ob und inwieweit das Fehlen vestibulärer Informationen

negative Auswirkungen auf die „Qualität“ der Simulation hat. Die Literatur bietet weder im Bezug auf virtuelle noch hinsichtlich realer Welten eindeutige Aussagen über den Einfluss vestibulärer Informationen auf komplexe Verhaltensleistungen des Menschen. Ähnlich wie beim Sehen sind die Eigenschaften des Vestibularsystems zumeist unter vereinfachten, isolierten Bedingungen erforscht worden.

Im Allgemeinen erfolgt bei Fahrsimulationen die Simulation vestibulärer Information durch die Verwendung von Bewegungsplattformen. Die operationelle Bandbreite dieser Systeme ist äußerst begrenzt. Eine lang andauernde translatorische Beschleunigung mit einer großen Amplitude muss deshalb durch eine Kombination translatorischer und rotatorischer Bewegungen simuliert werden. Nach dem Durchführen einer Bewegung mit großer Amplitude muss die Plattform wieder in eine zentrale Position gebracht werden, ohne dass der Benutzer dies bemerkt (Wash-Out). Die bei der Verwendung von Bewegungssimulationen auftretenden Kräfte und Beschleunigungen werden zwar zum Teil subjektiv als adäquat angesehen, objektiv betrachtet ist jedoch zu erwarten, dass unterhalb der Bewusstseinschwelle erkannt wird, dass es sich um eine zusammengesetzte und nicht eine einfache Beschleunigung handelt. „Oberhalb“ der Bewusstseinschwelle wird der Konflikt aufgelöst, da zusätzliche (z.B. visuelle) Informationen die widersprüchlichen Anteile der vestibulären Information überschreiben. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die eigentliche vestibuläre Information keinen Eingang in bestimmte Wahrnehmungsleistungen findet. Auffällig viele Benutzer verzeichnen nach der Teilnahme an Simulationen mit einem Bewegungssystem zumindest ein leichtes Gefühl des Schwindels und der Desorientierung. Einschlägige „Anekdoten“ der Simulationsbranche berichten zudem von Benutzern, welche die Qualität der Bewegungssimulation lobend hervor gehoben haben, obwohl diese schon zu Beginn der Simulation ausgefallen war.

Der Einsatz von Bewegungsplattformen ist im allgemein mit einem hohen Aufwand an Kosten und Zeit (Feinabstimmung und Instandhaltung) verbunden. Wie die Erfahrung zeigt, ist ein schlecht abgestimmtes Bewegungssystem der Qualität der Simulation eher schädlich als zuträglich. Es soll hier nicht in Frage gestellt werden, dass gewisse Anwendungen zu ihrer Funktionalität der Verwendung einer Bewegungsplattform bedürfen. Das System muss jedoch über die entsprechenden Leistungsdaten verfügen und muss ferner optimal abgestimmt sein. Bei der Verwendung von Bewegungssystemen ist besonders kritisch, dass Fehleinstellungen nicht wie bei Graphik und Audio ohne weiteres von Simulationsteilnehmern übersehen werden, sondern Fehleinstellungen haben zum Teil erhebliche Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit der Simulationsteilnehmer.

Bei aller Erfahrung, die bei der Verwendung von Bewegungsplattformen im Verlauf der letzten Jahre angesammelt worden ist, fehlt es doch an wissenschaftlichen Untersuchungen, die aus Sicht der Wahrnehmung gezielt Vorteile bzw. Auswirkungen einer Bewegungssimulation untersucht haben. Um solchen Fragestellungen genauer nachzugehen, wurde im Institut ein neues Labor aufgebaut, dessen zentraler Bestandteil eine Bewegungsplattform ist (von der Heyde, Braun, 1999).

A.3.9 Allgemeine Betrachtungen zum Fahrrad

Erwähnenswert ist, dass alle Benutzer ohne Schwierigkeiten mit der Bedienung des VR-Fahrrades zurecht kamen. Die zusätzliche propriozeptive Information beim Fahrradfahren hatte insgesamt nicht die gewünschte eindeutige Auswirkung auf das Navigationsverhalten des Menschen (siehe Kapitel 8). Auch bei Mochnatzki führte die Verwendung des VR-Fahrrades in „Hexatwon“ zu keinerlei Verbesserung der Genauigkeit der Schätzung von Hangneigungen (Mochnatzki, 1999; Mochnatzki, Steck, Mallot, 1999). Rieke konnte bei seinen Experimenten zur Untersuchung der Dreiecksvervollständigung unter Verwendung eines modifizierten Bewegungsmodells des VR-Fahrrades nur eine Verbesserung der Winkelgenauigkeit, nicht aber der Entfernungsschätzungen feststellen (Rieke, 1998). Diese Ergebnisse sind ein Hinweis dafür, dass ein hoch trainiertes System wie der Mensch mit einem Minimum an Informationen (hier: nur visuell) gleichwertige Leistungen erbringen kann. Andererseits sind die Ergebnisse auch ein Hinweis, dass wir vermutlich an der falschen Stelle nach dem Einfluss des Fahrrades gesucht haben. Wir hatten uns erhofft, dass sich das VR-Fahrrad vor allem auf Entfernungs- und Richtungseinschätzungen positiv auswirkt. Beide Wahrnehmungsleistungen sind aber auch auf der Basis rein visueller Informationen möglich, so dass sich der Wegfall propriozeptiver und vestibulärer Informationen bei Interaktion mit der Maus oder passiver Fortbewegung weniger stark ausgewirkt hat als erwartet. Gezielte Fragestellungen hinsichtlich des Einflusses propriozeptiver Informationen hätten vielleicht einen „messbaren“ Effekt des VR-Fahrrades offenbart.

Trotz dieser eher negativen „Ergebnisse“ ist es wichtig festzuhalten, dass die Versuchspersonen das Fahrrad als eine „angenehme Schnittstelle“ zur virtuellen Welt empfanden. Eine reizvolle Aufgabe für die Zukunft ist herauszufinden, welche Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung für diese Einschätzung verantwortlich sind. Wir sind überzeugt, dass die Grundlagen für die unterschiedliche Einschätzung der Eignung einer Schnittstelle nicht nur rein subjektiver Natur sind, sondern dass sich hinter diesen Einschätzungen grundlegende Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung verbergen. Die Eignung des VR-Fahrrades als Interaktionsgerät hat sich auch schon in *Diamond Park* einem „sozialen“ Mehrbenutzer-VR-System am MERL (Mitsubishi Electric Research Laboratory) gezeigt (Waters, Anderson, Barrus, Brogan, Casey, McKeown, Nitta, Sterns, Yerazunis, 1997).

A.4 Zweite Generation der Simulationsumgebung

A.4.1 Größe des Gesichtsfeldes

Im Zuge der ersten Experimente hatte sich angedeutet, dass ein größeres Gesichtsfeld bei den meisten Aufgaben vorteilhaft wäre. Simulationsteilnehmer versuchten des öfteren nach links oder rechts zu blicken, da sie von dort zusätzliche Informationen erhofften. Wie informelle Versuche gezeigt haben, bietet ein größeres Gesichtsfeld Simulationsteilnehmern gerade beim Kurvenfahren wertvolle Informationen, da es ihnen erlaubt ihre Kurvenfahrt langfristig zu planen.

Bei Navigationsexperimenten kann bei Vorliegen eines großen Gesichtsfeldes die Struktur der Umwelt in einem Blick erfasst werden, während bei einem kleineren Gesichtsfeld die gleiche Information nur durch mehrmaliges Drehen erreicht werden kann. Obwohl noch nicht geklärt, so ist es doch zumindest fraglich, ob mehrere aufeinanderfolgende Ansichten die gleiche Information über die Struktur der Umwelt liefern können wie eine Ansicht mit einem großen Gesichtsfeld. Die Verwendung großer Gesichtsfelder führt allerdings zur Wahrnehmung einer Eigenbewegung einzig und allein auf der Basis visueller Informationen („Vection“, Dichgans, Brandt, 1972). Da bei den meisten Simulationen ein Widerspruch zwischen visueller und vestibulärer Informationen besteht, kommt es hierdurch häufig zum Auftreten von Symptomen der Simulationskrankheit.

Trotzdem heben unserer Meinung nach die Vorteile eines größeren Gesichtsfeldes dessen potentielle Nachteile und Risiken auf. Vor allem deshalb, weil bei der Verwendung des Fahrrades neben der visuellen auch propriozeptive und zu kleinen Teilen vestibuläre (Kippbewegung) Informationen zur Verfügung stehen. Die zusätzlichen Informationen sollten dazu beitragen, die Häufigkeit der Symptome der Simulationskrankheit auf ein Minimum zu reduzieren.

A.4.2 Implementierung

Aufgrund der Ergebnisse der Vor-Experimente sowie obiger Überlegungen haben wir uns deshalb entschlossen die Projektionsleinwand der ersten Generation des Simulators durch eine kegelstumpfförmige Leinwand zu ersetzen (Radius: 3.0m; Höhe: 2.8m, Abb. 57). Der obere Rand der Leinwand war im Vergleich zum unteren Rand leicht nach hinten versetzt. Für einen Beobachter im Zentrum des Kegelstumpfes ergab sich ein Gesichtsfeld der Größe 180x45°. Die Leinwandoberfläche bestand aus speziellen Spanplatten, die durch ein ITEM®-Gerüst getragen wurden. Bestrichen wurden die Platten mit einer matten weißen Wandfarbe (Lichtverstärkungsfaktor: 1.0). Das Verwenden einer vergleichsweise matten Farbe ist vorteilhaft, da dies zu einer Reduktion des Anteils der Cross-Reflektionen beiträgt. Nachteilig ist jedoch, dass das Verwenden einer matten Farbe zu Helligkeits- und Kontrasteinbußen führt.

Die Darstellung der Bilder erfolgte in Form einer Aufprojektion unter Verwendung von drei CRT-Projektoren (Ampro 3600). Ein kontinuierlicher Übergang zwischen den Bildern der drei Projektoren

wurde durch die Verwendung eines Soft-Edge-Blending Systems (Panomaker II von Panoram™) erreicht. Die „Berechnung der virtuellen Welt“ erfolgte wie in der ersten Generation der Simulationsanlage durch die Silicon Graphics™ Onyx RealityEngine2. Da der Rechner mit einer „Multi-Channel-Option (MCO)“ ausgestattet war, konnten mit einer Graphik-Pipeline drei Bilder mit einer Auflösung von 1025x768 erzeugt werden.

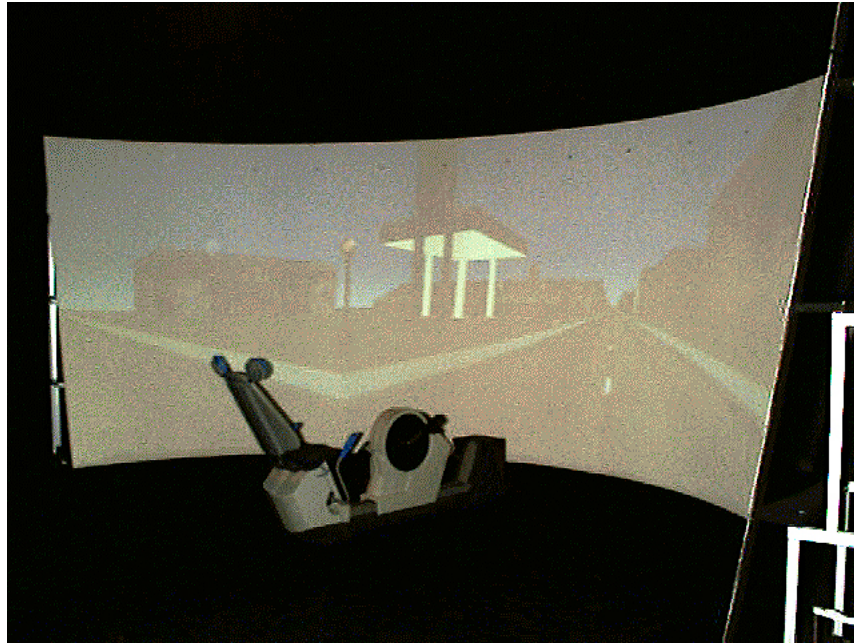


Abb. 57 Die Abbildung zeigt die kegelstumpfförmige Leinwand der zweiten Generation der Simulationsanlage.

Die Ergebnisse des Geschwindigkeitsexperimentes haben den positiven Einfluss der Gesichtsfeldgröße auf eine Wahrnehmungsgröße bestätigt (siehe Abschnitt 6.8). Bei Navigationsexperimenten hat es sich ähnlich wie im Fall des VR-Fahrrades als schwierig erwiesen, einen positiven Einfluss der Größe des Gesichtsfeldes experimentell zu belegen. Die subjektiven Einschätzungen von Versuchspersonen geben zwar Hinweise, dass es bei einem größeren Gesichtsfeld leichter und „angenehmer“ ist sich zurechtzufinden, die experimentellen Befunde lassen jedoch hinsichtlich der gemessenen Größen (Richtung und Entfernung) keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu.

Der Bau einer kegelstumpfförmigen Leinwand war durch Erkenntnisse aus der menschlichen Wahrnehmungsforschung motiviert worden. Je weiter ein „sichtbares“ (nicht verdecktes) Objekt vom Betrachter entfernt ist, desto höher kommt es im Gesichtsfeld zu liegen. Diese Beziehung bleibt auch bei Projektion einer 3D-Szene auf eine Leinwand, die einen senkrechten vertikalen Verlauf hat erhalten. Nicht erhalten bleibt jedoch, dass bei weiter entfernten Objekten auch die Helligkeitsinformation aus größerer Entfernung stammt. Mit Hilfe der leichten Neigung der Leinwand wollten wir zumindest zu einem kleinen Prozentsatz die Gegebenheiten in der natürlichen Umwelt widerspiegeln. Da die Vergenz- und Akkomodationssteuerung des menschlichen Auges bei der

Tiefenwahrnehmung sehr eng miteinander gekoppelt sind, wollten wir bereits auf Seiten der „Hardware“ des Simulators der visuellen Informationsverarbeitung entgegen kommen. Aufgrund vieler technischer Probleme (s.u.) ist es uns jedoch nie gelungen einen eindeutigen Nachweis zu führen, dass die verwendete Leinwandform zu einer verbesserten Tiefenwahrnehmung führt.

A.4.3 Korrektur der Geometrieverzerrungen

Beim Aufbau der zweiten Generation des Simulators hat sich gezeigt, dass in einer 3-Kanal-Anlage sowohl die Einstellung der Projektoren als auch die Einstellung des Soft-Edge-Blendings zeit-intensive Prozesse sind. Des weiteren mussten wir erkennen, dass die Grenzen des technisch machbaren sehr schnell erreicht sind.

Da in der Computer-Graphik eine 3D-Szene auf einer flachen Projektionsebene abgebildet wird, führt die Projektion dieses Bildes auf eine gekrümmte Leinwandoberfläche zu geometrischen Verzerrungen. Damit eine gerade Linie auch als solche auf der Leinwand abgebildet wird, muss die Darstellung des Bildes durch den Projektor entsprechend korrigiert werden. CRT-Projektoren bieten zwar erweiterte Einstellmöglichkeiten zur Korrektur der Geometrie, jedoch sind auch hier nur Korrekturen bis zu einem bestimmten Grad möglich. Bei der vorliegenden Konfiguration (3 Projektoren, 180 Grad Gesichtsfeld, Kegelstumpf-Leinwand) wären auch die Einstellmöglichkeiten der neuesten Generation von CRT-Projektoren nicht ausreichend gewesen, um die Geometrie der Abbildung korrigieren zu können. Die Beschränkungen der Geometrieinstellungen werden vor allem in den Überlappungsbereichen zwischen zwei Projektoren sichtbar (Abb. 58). In diesen Bereichen ist es notwendig, dass ein Pixel eines Projektors genau auf dem entsprechenden Pixel³⁹ des anderen Projektors zu liegen kommt. In unserem Fall waren die geometrischen Einstellmöglichkeiten der Projektoren vor allem im oberen und unteren Gesichtsfeldbereich nicht ausreichend, um die Bilder der zwei Projektoren zur Deckung zu bringen. Auch wenn sich die betreffenden Zonen im gewissen Sinne bereits in den Randbereichen des vertikalen Gesichtsfeldes befinden, können sich Fehler in der Darstellung in Abhängigkeit von der Blickrichtung des Betrachters störend auf die visuelle Wahrnehmung auswirken. Fazit ist, dass bei Verwendung von drei Projektoren das horizontale Gesichtsfeld maximal 150° betragen sollte,⁴⁰ damit eine Korrektur der Geometrie erreicht werden kann. Die Situation entschärft sich etwas, wenn die Projektionsfläche nicht mehr kegelstumpf-, sondern zylinderförmig ist (siehe dritte Generation der Simulationsanlage). Aber auch unter diesen Bedingungen müssen die technischen Möglichkeiten der Projektoren vollständig ausgereizt werden, um eine zufriedenstellende Justage zu erreichen. Die volle Aussteuerung der Geräte wirkt sich aber

³⁹ Entsprechendes Pixel bedeutet, daß zwei Pixel übereinander zu liegen kommen, die den gleichen Ausschnitt der Szene darstellen.

⁴⁰ Diese Erkenntnis kam eigentlich erst mit dem Aufbau der Leinwand der dritten Generation der Simulationsanlage zustande. Zuvor wurde vermutet, daß der Austausch der kegelstumpfförmigen durch eine zylindrische Leinwand zur Behebung des Problems führen würde.

wiederum negativ auf die Lebenszeit bestimmter Bauteile der Projektoren aus.

A.4.4 Kalibration der Helligkeit und Farbe

Das Einstellen der Helligkeit und der Farben in den Überlappungsbereichen hat sich als besonders anspruchsvolle Aufgabe erwiesen. Abb. 58 zeigt schematisch das Prinzip des Soft-Edge-Blendings. In den Überlappungsbereichen zwischen zwei Projektoren wird die Helligkeit der einzelnen Bilder (Abb. 58, unten) durch das Soft-Edge-Blending-System so geregelt, dass das Gesamtbild einen gleichmäßigen Helligkeitsverlauf besitzt. Voraussetzung ist allerdings eine perfekte Einstellung der Geometrie der Projektoren, die korrespondierende Pixel in beiden Bildern exakt zur Deckung bringt. Ist dies nicht gegeben, wird das Erscheinungsbild der Überlappzone unabhängig von der Qualität der Einstellung des Soft-Edge-Blending-Systems mangelhaft sein.

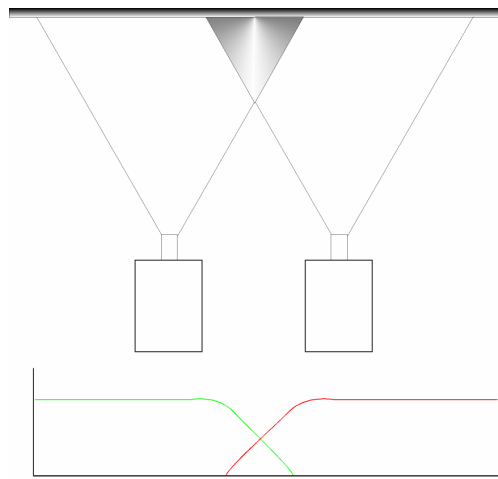


Abb. 58 Schematische Darstellung des Prinzips eines Soft-Edge-Blending Systems. Oben: Die projizierten Bilder zweier Projektoren (Aufsicht) überlappen in den Randbereichen (schattierter Bereich). Unten: Schematische Darstellung der Helligkeitsverläufe (y-Achse) der Bilder der beiden Projektoren (linker Projektor: grün, rechter Projektor: rot).

Je nach verwendeter Soft-Edge-Blending-Technologie müssen die Helligkeiten für jede der drei Grundfarben (R, G, B) gesondert eingestellt werden. Die Erfahrung zeigt inzwischen, dass selbst bei Verwendung technischer Messgeräte zur Unterstützung des Einstellens der Helligkeit das menschliche Auge auch dann noch Unterschiede wahrnimmt, wenn technisch gesehen die Helligkeit perfekt abgestimmt ist. Beim Einstellen des Soft-Edge-Blendings machte es sich besonders negativ bemerkbar, dass das Auge nach einiger Zeit an die Umweltbedingungen adaptiert. Für diejenige Person, welche die Justage durchführt, erscheint die Einstellung ab einem bestimmten Zeitpunkt optimal zu sein. Andere Personen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt den Simulatorraum betreten, erkennen aber sofort Diskontinuitäten im Helligkeitsverlauf in den Überlappungsbereichen. Das Einstellen des Soft-Edge-Blendings erfordert also entweder den Einsatz mehrerer Personen oder falls nur eine Person die Einstellungen ausführt, sollte diese häufiger Pausen einlegen. Neben Problemen

bei der Einstellung hat sich auch eine Szenenabhängigkeit der Einstellung herausgestellt. Eine Einstellung für eine Tag-Szene war häufig unbrauchbar für Nebel- oder Nacht-Szenen und umgekehrt. Eine wichtige Erkenntnis der Verwendung des Soft-Edge-Blending-Systems ist, dass Geräte und Methoden, die aus technischer und theoretischer Sicht zu einer optimalen Lösung führen sollten, unter Einbeziehung der menschlichen Wahrnehmung unerwartete Nebeneffekte zeigen. Deshalb ist es bei der Entwicklung von Konzepten und Geräten für VR wichtig die Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung einzubeziehen und nicht nur auf technisch-theoretisch motivierte Betrachtungen zu vertrauen.

A.5 Dritte Generation der Simulationsumgebung

Wurde die Planung und Implementierung der ersten und zweiten Generation der VR-Anlage vorwiegend von zwei Personen (Distler, Bühlhoff) durchgeführt, so waren im Zuge der Planung und Implementierung der dritten Generation eine Vielzahl von Personen beteiligt (Van Veen, Bühlhoff, Braun, Distler, Wallis, Geiger, Chatziastros). Die zunehmende Zahl der Personen spiegelt sich vor allem in der zunehmenden Zahl der Bedienelemente wieder.

Da die Projektoren der zweiten Generation der VR-Anlage nicht in der Lage waren, die vom Rechner bereit gestellte planare Abbildung entsprechend der Leinwandform zu entzerren, haben wir die kegelstumpfförmige durch eine zylinderförmige Leinwand (Radius 3.5m, Höhe 3.15m) ersetzt. Im Gegensatz zur zweiten Generation bestand die Leinwandoberfläche nicht aus Span-, sondern aus Gipsplatten.⁴¹ Die Projektoren der zweiten Generation (Ampro™ 3600) wurden durch Electrohome Marquee 8000 CRT-Projektoren ersetzt. Wie bereits zuvor erwähnt wurde, hätten wir gleichzeitig eine Verkleinerung des Gesichtsfeldes in Kauf nehmen müssen um eine vollständige Behebung der Geometrie-Probleme zu erreichen.

Aufgrund der Größe des Gesichtsfeldes führte die Verwendung eines Simulationsrechners mit nur einer Graphik-Pipeline in der zweiten Generation der Simulationsanlage zu einer relativ geringen Bildwiederholrate. Ferner war in der zweiten Generation die räumliche Auflösung der Szene, bedingt durch die Verwendung der MCO, geringer als in der ersten Generation. Auch führte der limitierte Texturspeicher des Rechners zu Beschränkungen bei der Darstellung von Detailstrukturen. Um diesen Aspekten Rechnung zu tragen, wurde ein neuer, sehr leistungsfähiger Rechner (Silicon Graphics Onxy2 InfiniteReality, 3 Graphik-Pipelines, 2xRM6 mit 64 MB TRAM pro Pipeline, 10x190Mhz R10000 Prozessoren, 2.5 GB Hauptspeicher) in die Anlage integriert. Der Rechner ist in der Lage pro

⁴¹ In der Zwischenzeit haben sich Glasfaser-Kunststoffe als Grundmaterial für den Bau von Leinwänden durchgesetzt. Vorteil dieser Technologie ist, daß Glasfaser-Kunststoffe in vergleichsweise großen Segmenten verarbeitet werden können. Je nach Größe des Zugangs zum Simulatorraum kann ein Segment der Leinwand eine horizontale Größe von 60° oder mehr haben. Durch die geringe Anzahl der Segmente ergibt sich eine gleichmäßig glatte Oberfläche. Nachteilig ist, daß man zum Herstellen der Segmente eine Negativ-Schablone benötigt. Die Entwicklungskosten für die Herstellung der Schablone zahlen sich erst beim Bau mehrerer identischer Leinwand-Segmente aus.

Wahrnehmung in Virtuellen Welten

Kanal Bilder mit einer Auflösung von 1920x1080 Pixeln zu erzeugen. Da weder die Projektoren noch das Soft-Edge-Blending-System eine derart hohe Auflösung verarbeiten können, wurde die Auflösung während der Simulation auf 1280x1024 Pixel beschränkt. Je nach Komplexität der dargestellten Szene beträgt die Bildwiederholrate 36 bzw. 72 Hz. Die Verwendung eines solch leistungsfähigen Rechners zeigt, dass neben der Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle die Verbesserung der Technologie einen gewichtigen Platz einnimmt. Die Verwendung dieses Rechners steht nicht im Widerspruch zu den Forderungen dieser Arbeit nach einer wahrnehmungsgerechteren Ausrichtung der Technologie-Entwicklungen. Die Beschaffung des Rechners war vor allem durch die Größe Gesichtsfeldes notwendig geworden. Des weiteren waren wir der Ansicht, dass im Rahmen des Virtual Tübingen Projektes (Van Veen, Distler, Braun, Bühlhoff, 1998) ein großer Texturspeicher zur Verfügung stehen müsste. Wie sich inzwischen gezeigt hat, war selbst ein Texturspeicher von 64 MB nicht ausreichend, um die Häusertexturen in der gewünschten Auflösung verwenden zu können. Inzwischen ist fraglich, ob eine derart hochauflösende Darstellung der Häuserfassaden (Breite einer Hausfassade = 1024 Pixel) zu „erkennbaren“ Verbesserungen in den Verhaltensleistungen von Versuchspersonen führt.

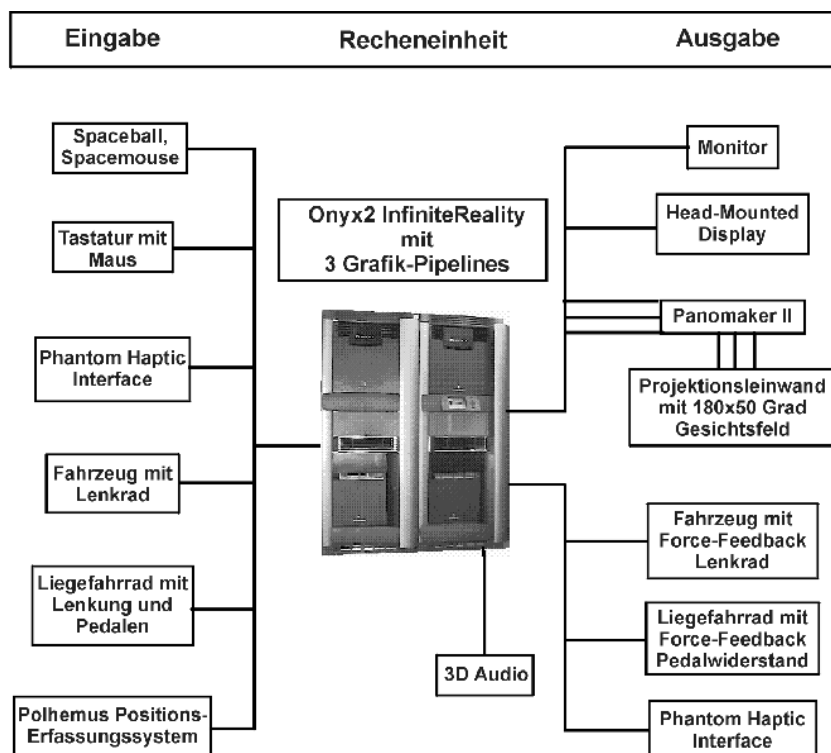


Abb. 59 Schematische Darstellung der Ein- und Ausgabegeräte und deren Anbindung an den Simulationsrechner in der dritten Generation der Simulationsanlage.

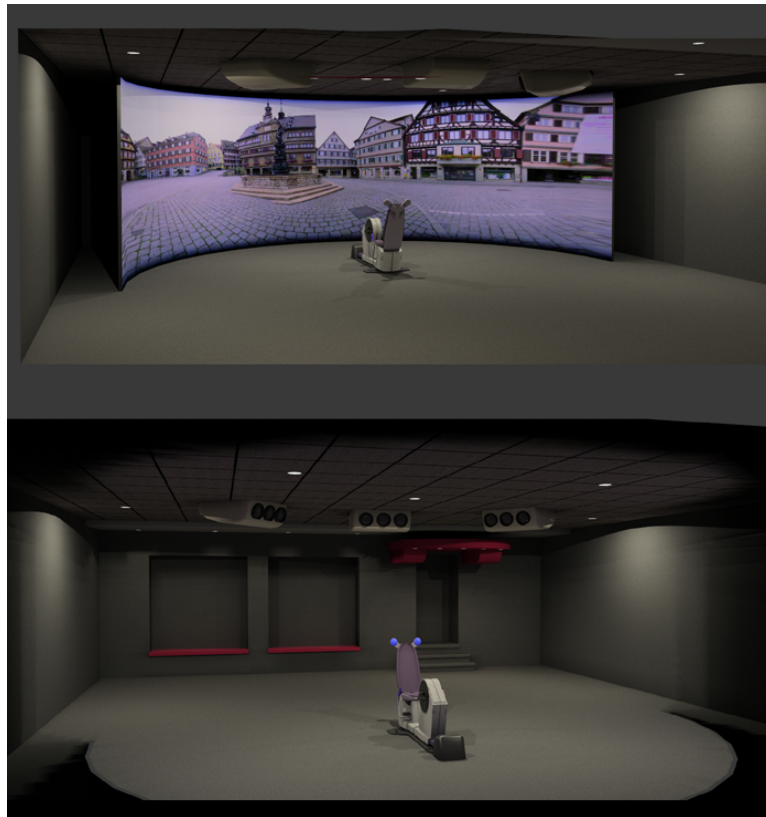


Abb. 60 Die Bilder zeigen zwei Ansichten der dritten Generation der Simulationsanlage (Radiosity-Rendering⁴²). Im Vergleich zur zweiten Generation wurde die Neigung der Leinwand entfernt und ein neuer leistungsfähigerer Simulationsrechner in die Anlage integriert.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Simulationsanlagen der ersten und zweiten sowie jener der dritten Generation liegt in der Wahl der Raumfarbe. Während in den ersten beiden Generationen der Raum mit Ausnahme der Leinwand komplett in schwarz ausgelegt war, wurde in der dritten Generation eine hellere Farbe (grau) gewählt. Wir sind in den ersten beiden Generationen der Simulationsanlage davon ausgegangen, dass alle Elemente des Raumes mit Ausnahme der virtuellen Welt unsichtbar sein sollten, um somit eine bessere „Immersion“ und ein erhöhtes „Presence“-Gefühl der Teilnehmer zu erreichen. Unsere Erfahrungen sowie die Arbeiten einer anderen Gruppe (Szalavári, Gervautz, 1998) haben gezeigt, dass die virtuelle und die reale Welt untrennbar miteinander verbunden sind. Ein optimales Ergebnis bei der Entwicklung von VR-Anwendungen kann nur erreicht werden, wenn diese Erkenntnis in den Entwicklungsprozess einbezogen wird. Ein schwarzer Raum mag das Eintauchen in die Virtualität erleichtern, allerdings führt ein schwarzer Raum bei der Rückkehr des Teilnehmers aus diesem Zustand auch zu einem Gefühl der Desorientierung. Zum Zeitpunkt der Rückkehr aus der Immersion bietet weder die virtuelle Welt noch die reale Welt - da schwarz und deshalb nicht sichtbar - Ankerpunkte zur räumlichen Orientierung. In einem hellen Raum nehmen die Simulationsteilnehmer zu jedem Zeitpunkt die räumlichen Strukturen der realen

⁴² Die Aufnahmen wurden freundlicherweise von Scott Yu zur Verfügung gestellt.

Umgebung wahr. Bei der Rückkehr aus der Immersion sind die Simulationsteilnehmer somit bereits auf das reale Umfeld vorbereitet.

Im Verlauf der Beschreibung der „Evolution des Simulators“ wurde der Diskussion der Erweiterung des Gesichtsfeldes viel Platz eingeräumt. Angesprochen war dabei natürlich die Erweiterung des horizontalen Gesichtsfeldes. Mit Ausnahme der Geschwindigkeitswahrnehmung (siehe Abschnitt 6.8) waren die Effekte der Erweiterung des horizontalen Gesichtsfeldes geringer als erwartet. Weder Distler et al. (1998) noch Rieke (1998) konnten einen eindeutigen Effekt der Größe des horizontalen Gesichtsfeldes auf Verhaltensleistungen nachweisen. Offen bleibt nach wie vor die Frage nach dem Einfluss der Größe des vertikalen Gesichtsfeldes. Planetarien, aber auch die IMAX®-Technologie geben einen ersten Einblick in die Möglichkeiten eines, großen, und symmetrischen Gesichtsfeldes. Erste Implementierungen von Projektionssystemen, die dem Betrachter auch ein großes vertikales Gesichtsfeld bieten sind auch in der digitalen Welt der VR zu finden (VisionDome™ der Elumens Corporation, Abb. 61).

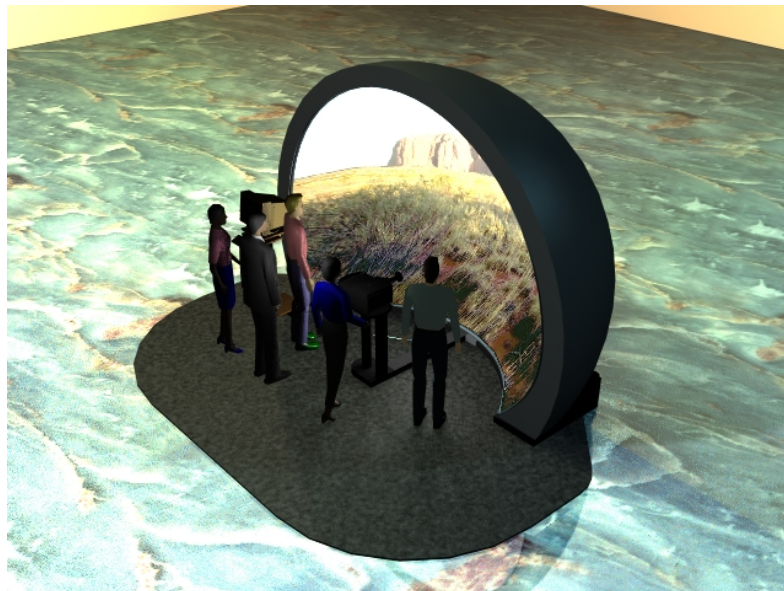


Abb. 61 Das Radiosity-Rendering zeigt den VisionDome™. Die Aufnahme wurde freundlicherweise von der Elumens Corporation zur Verfügung gestellt

A.6 Ausblick

Die dritte Generation der VR-Anlage weist auf ein grundlegendes Problem beim Betrieb von VR-Anlagen hin. Die Planung, der Aufbau und die Instandhaltung einer sogenannten High-End-VR-Anlage ist mit einem hohen Aufwand an Personal, Zeit und Kosten verbunden. Des weiteren erfordert der Betrieb einer Simulationsanlage bzw. die Implementierung einer neuen Anwendung Mitarbeiter mit Spezialausbildung. An vielen Universitäten und Forschungsinstituten benötigen Mitarbeiter ca. 1-2 Jahre Einarbeitungszeit, bevor sie selbst in der Lage sind, komplexere Anwendungen zu

implementieren. Der ständige Wechsel der Hard- und Softwarekomponenten trägt ein übriges dazu bei, die Mitarbeiter mit dem Erlernen neuer Technologien zu beschäftigen. Die Mitarbeiter haben letztendlich kaum Zeit für ihre eigentlichen Aufgaben. Damit sich Anwender in Zukunft wieder ihren eigentlichen Aufgaben zuwenden können, wären spezifische Studiengänge notwendig, die Studenten gezielt auf die „neue“ Problematik virtueller Welt vorbereiten. Weder ein „Experimental-Psychologe“ ohne technisches Grundwissen noch ein Techniker ohne biologisch-psychologischen Hintergrund kann erfolgreich in oder an virtuellen Welten arbeiten. Modulare Simulations-Anlagen im „Plug and Play“-Stil wären ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung einer anwenderfreundlichen VR. „Plug and Play“ bedeutet nicht, dass der Anwender keinen Einfluss auf die Konfiguration und Arbeitsweise seiner VR-Anlage hat, sondern die Integration einzelner Komponenten in ein Gesamtsystem sollten über definierte, einfach zu handhabende Hard- und Software-Schnittstellen erfolgen.

Literatur

- Adelson, E.H., Bergen, J.R. (1985). Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 284-299.
- Alfano, P.L, Michel, G.E. (1990). Restricting the field of view: Perceptual and performance effects. *Perceptual and Motor Skills*, 70, 35-45
- Allen, G.L., Kirasic, K.C., Siegel, A.W., Herman, J.F. (1979). Developmental issues in cognitive mapping: The selection and utilization of environmental landmarks. *Child Development*, 50, 1062-1070
- Akeley, K. (1993). Reality Engine Graphics. *Siggraph '93 Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1993*, 109-116
- Batschelet, E. (1980). Einführung in die Mathematik für Biologen. [translation: Introductory Mathematics for Biologists] Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Berthelon, C., Mestre, D. (1993). Visual cues for the detection of impending collision at cross-roads: the case of curvilinear self motion, in: A.G. Gale et al. (Eds.) *Proceedings of Vision in Vehicles IV*, 101-108, Elsevier Science, Amsterdam.
- Biocca, F. (1992). Will simulation sickness slow down the diffusion of virtual environment technology? *Presence*, 1(3), 334-343
- Blakemore, M.R., Snowden, R.J. (1999). The effect of contrast upon perceived speed: a general phenomenon? *Perception*, 28, 33-48
- Bliss, J.P., Tidwell, P.D., Guest, M.A. (1997). The effectiveness of virtual reality for administering spatial navigation training to firefighters. *Presence*, 6(1), 73-86
- Boring, E.G. (1946). The perception of objects. *American Journal of Physics*, 14, 99-107
- Brenner E., van Damme, W.J. (1999). Perceived distance, shape and size. *Vision Research*. 39 (5), 975-986
- Breul, H.T. (1981). Some effects of field of view (FOV) and target size on lateral tracking at hover. In Lyman & Bejcsz (Eds.) *Proceedings of the 17th Annual Conference on Manual Control*, 81-95
- Brooks, F.P., Jr. (1986). A dynamic graphics system for simulation virtual buildings. *Proceedings 1968 Workshop on Interactive 3D Graphics*, ACM Press, New York, 1986, 9-21
- Brooks, F.P. Jr. (1994). Is there any real virtue in virtual reality? Public Lecture, London 30. Nov. 1994, <http://www.cs.unc.edu/~brooks>
- Brooks, F.P., Jr. (1999) What's real about virtual reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19 (6), 16-27
- Brown, J.F. (1928). Über gesehene Geschwindigkeiten. *Psychologische Forschung*, 10, 84-101
- Brown, J.F. (1931). The visual perception of velocity. *Psychologische Forschung*, 14, 199-232

- Bülthoff, H.H., Mallot, H. (1988) Integration of depth modules: stereo and shading. *Journal of the Optical Society of America A*, 5, 1749-1758.
- Bülthoff, H.H., Yuille, A.L. (1991). Bayesian models for seeing shapes and depth. *Comments Theoretical Biology*, 2(4), 283-314
- Bülthoff, H.H., Foese-Mallot, B.M., Mallot, H.A. (1997). Virtuelle Realität als Methode der modernen Hirnforschung. In Krapp und Wägebaur (Eds.) *Künstliche Paradiese Virtuelle Realitäten*, Wilhelm Fink Verlag,
- Bülthoff, H.H., van Veen, H.A.H.C. (1999). Vision and action in virtual environments: Modern Psychophysics in Spatial Cognition Research. Technical Report No. 77, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen.
- Campbell, F.W., Maffei, L. (1981). The influence of spatial frequency and contrast on the perception of moving patterns. *Vision Research*, 21, 713-721.
- Carlin, H.S., Hoffmann, H.G., Weghorst, S. (1997). Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia: a case report. *Behaviour, Research & Therapy*, 35, 153-158
- Cavallo, V. Laurent, M. (1988). Visual information and skill level in time-to-collision estimation, *Perception*, 17, 623-632.
- Chance, S.S., Gaunet, F., Beall, A.C. Loomis, J.M. (1998). Locomotion mode affects updating of objects encountered during travel: The contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration. *Presence*, 7(2), 168-178
- Chatziastros, A., Wallis, G.M., Bülthoff, H.H. (1999). The effect of field of view and surface texture on driver steering behaviour. In Gale et al. (Eds.), *Vision and Vehicles VII*, Elsevier-Science B.V., Amsterdam,
- Chatziastros, A., Wallis, G.M., Bülthoff, H.H. (2000). The use of optical flow and splay angle in steering a central path. In Gale et al. (Eds.), *Vision and Vehicles VIII*, Elsevier-Science B.V., Amsterdam,
- Chen, Y., Bedell, H.E., Frishman, L.J. (1998). The precision of velocity discrimination across spatial frequency. *Perception & Psychophysics*, 60(8), 1329-1336
- Chrsitensen, R. (1998). Inertial force feedback for a locomtion interface. *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) Dynamic Systems and Control Division*, DCS-Vol. 64, ASME, New york ,1998, 119-126
- Cohen, R., Baldwin, L.M., Sherman, R.C. (1978). Cognitive maps of a naturalistic setting. *Child Development*, 49, 1216-1218
- Crowell, J.A., Banks, M.S., Shenoy, K.V., Andersen, R.A. (1998). Visual self-motion perception during head turns. *Nature Neuroscience*, 1(8), 732-737
- CyberGear. (1995). VRBike Research Plattform (Software Specifications) und VRBike Flyer
- Darken, R.P, Sibert, J.L., (1996a). Wayfinding strategies and behaviors in large virtual worlds. *Proceedings of ACM SIGCHI 96*, 142-149

- Darken, R.P., Sibert, J.L. (1996). Navigating large virtual space. *International Journal of computer interaction* 8 (1), 49-71
- Darken, R.P., Carmein, D. (1997). The omni-directional treadmill: A locomotion device for virtual worlds. *Proceedings of UIST '97*, 213-221
- Denton, G.G. (1980). The influence of visual pattern on perceived speed. *Perception*, 9, 393-402.
- Dichgans, J., Brandt, T. (1978). Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. *Handbook of Sensory Physiology, Volume VIII (Peception)*, 756-804, Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- Diener, H.C., Wist, E.R., Dichgans, J., Brandt, T. (1976). The spatial frequency effect on perceived velocity. *Vision Research*, 16,169-176.
- Distler, H.K. (1996). Psychophysical experiments in virtual environments. In: *Virtual Reality World 96 Conference Documentation*, München 1996: Computerwoche Verlag AG
- Distler, H.K., Bühlhoff, H.H. (1996). Velocity perception in 3D environments, *Perception*, 25, suppl., #58.
- Distler, H.K., Gegenfurtner, K.R., Van Veen, H.A.H.C., Hawken, M.J. (1997). Velocity constancy in virtual reality environments. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, Vol. 38, No. 4, #370
- Distler, H.K., van Veen, HAHC, Braun, S., Bühlhoff, H. (1998). Untersuchung komplexer Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen des Menschen in virtuellen Welten. In I. Rügge, B. Robben, E. Hornecker, F.W. Bruns (Eds.) *Arbeiten und begreifen: Neue Mensch-Maschine-Schnittstellen*. 159-172, LIT-Verlag, Münster
- Distler, H. K., Pelah, A., Bell, A. G. & Thurrell, A. E. I. (1998). The perception of absolute speed during self-motion. *Perception* 27, Supplement, #147b
- Distler, H.K., van Veen, H.A.H.C., Braun, S.J., Heinz, W., Franz, M.O., Bühlhoff, H.H. (1998). Navigation in real and virtual environments: Judging orientation an distance in a large-scale landscape. In M. Göbel, J. Landauer, U. Lang, M. Walper (Eds.) *Virtual Environments' 98*, 124-133, Springer, Wien, New York
- Dosher, B.A., Sperling, G., Wurst, S. (1986). Tradeoffs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived structure. . *Vision Research*, 26(6), 973-990
- Edgar, G.K., Bex, P.J. (1995). Vision and displays. In Carr & England (eds.) *Simulated and Virtual Realities*. Taylor Francis, London
- Ellis, S.R. (1991). Nature and origins of virtual environments: a bibliographical essay. *Computing systems in engineering*, 2 (4), 321-347
- Ellis. S.R., Kaiser, M., Grunwald, S.R. (Eds.) (1993). *Pictorial communication in real and virtual environments*. Taylor & Francis, London, Washington, DC
- Epstein, W. (1973). The process of ‚taking-into-account‘ in visual perception. *Perception*, 2, 267-285

- Epstein, W. (1978). Two factors in the perception of velocity at a distance. *Perception & Psychophysics*, 24, 105-114
- Epstein, W., Cody, W.J. (1980). Perception of relative velocity: A revision of the hypothesis of relational determination. *Perception*, 9, 47-60
- Evans, L. (1970). Speed estimation for a moving automobile. *Ergonomics*, 13, 219-230
- Fahle M. (1997). Specificity of learning curvature, orientation, and vernier discriminations. *Vision Research*. 37 (14), 1885-1895
- Ferrera, V.P. Wilson, H.R. (1991). Perceived speed of moving two dimensional patterns. *Vision Research*, 31(5), 877-93
- Gegenfurtner, K.R., Mayser, H., Sharpe, L.T. (1999). Seeing movement in the dark. *Nature*. 398 (6727), 475-476
- Gibson, J.J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69, 477-491.
- Gibson, J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Houghton, Mifflin, Boston, MA
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton, Mifflin, Boston, MA.
- Gibson, W. (1984). *Neuroromancer*. Ace Books
- Gillner, S., Mallot, H.A. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze, *Journal of Cognitive Neuroscience* 10, 445-46
- Glennerster, A., Rogers, B.J., Bradshaw, M.F. (1998). Cues to viewing distance for stereoscopic depth constancy. *Perception*, 27(11), 1357-1365
- Gregory, R.L. (1973). Distortion of visual space as inappropriate constancy scaling. *Nature*, 199, 678-680
- Gzywacz, N.M, Yuille, A.L. (1990). A model of the estimate of local image velocity by cells in the visual cortex. *Proceedings of the Royal Society London B*, 239, 129-161
- Haerberli, P., Segal, M. (1993). Texture mapping as a fundamental drawing primitive. In Cohen, Puech Sillion (eds). *Proceedings of the Fourth Eurographics Workshop on Rendering*. Paris, France
- Hawken, M.J., Gegenfurtner, M.J., Tang, C. (1994). Contrast dependence of colour and luminance motion mechanisms in human vision. *Nature*, 367, 268-270.
- Heckbert, P.S. (1989). *Fundamentals of texture mapping and image warping*, Master's Thesis University of California, Berkeley
- Heeger, D.J. (1987). Model for the extraction of image flow. *Journal of the Optical Society of America*, A4, 1455-1471
- Heeger, D.J. (1998). Optical flow using spatio-temporal filters. *International Journal for Computer Vision*, 1, 279-302.
- Heisenberg, M., Wolf, R. (1984). *Vision in drosophila*. Springer Verlag, Berlin

- Henry, D. (1992). Spatial perception in virtual environments: Evaluating an architectural application. Unpublished Master Thesis, University of Washington
- Hershenson, M. Samuels, S.M. (1999). An airplane illusion: apparent velocity determined by apparent distance. *Perception*, 28, 433-436
- Hirose, M., Yokoyama, K (1992). VR application for transmission of synthetic sensation. Proceedings of the International Conference on Artificial reality and Tele-Existence (ICAT 92). Nihon Keizai, Shimbun, Tokyo, 145-154
- Hodgins, J.K., O'Brien, J.F., Tumblin, J. (1997): Do geometric models affect judgements of human motion? Proceedings of Graphics Interface '97, 17-25
- Iwata, H. (1990). Artificial reality for walking about a large-scale virtual space. *Human Interface News and Report*, 5 (1), 21-25
- Iwata, H. (1999) The torus treadmill: Realising locomotion VEs. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 19 (6), 30-35
- Johnson, E.B. Cumming, B.G. Parker, A.J. (1993) Integration of depth modules: stereopsis and texture. *Vision Research*, 33, 813-826.
- Johnson, E.B., Cumming, B.G., Landy, M.S. (1994). Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, 34, 2259-2275
- Kalawsky, R.S. (1993). The science of virtual reality and virtual environments. A technical, scientific and engineering reference on virtual environments. Addison-Wesely Publishing Company, 1993
- Kaufman, L. (1982). Sight and mind: an introduction to visual perception. New York, O.U.P.
- Kraft, C.L., Anderson, C.D., Elworth, C.L. (1980). Peripheral cues and color in visual simulation. Seattle, WA: Boeing Aerospace Co., Crew Systems, Data Processing Technology
- Kelly, D.H. (1975). Spatial frequency selectivity in the retina. *Vision Research*, 15, 665-672
- Kelly, D.H. (1979). Motion and vision. II. Stabilized spatio-temporal threshold surfaces. *Journal of the Optical society of America*, 69(10), 1340-1349
- Kelly, D.H. (1984). Retinal inhomogeneity: I. Spatio-temporal contrast sensitivity. *Journal of the Optical society of America A*, 1(1), 107-113
- Kennedy, R.S., Lanham, D.S., Drexler, J.M., Massey, C.J., Lilienthal, M.G. (1997). A comparison of cybersickness incidences, symptom profiles, measurement techniques, and suggestions for further research. *Presence*, 6(6), 638-644
- Kennedy, S.R., Lane, N.E., Lilienthal, M.G., Berbaum, K.S., Hettinger, L.J. (1992). Profile analysis of simulator sickness symptoms: Application to virtual environment systems. *Presence: Teleoperators & Virtual Environment*, 1 (3)
- Kennedy, S.R., Jones, M.B., Lilienthal, M.G., Harm, D.L. (1993). Profile Analysis of after-effect experienced during exposure to several virtual reality environments. Proceedings of the 76 th

- Aerospace Medical, Panel Meeting on „Virtual Interfaces: Research and applications, Oct. 1993, Lisbon, Portugal.
- Ko, H., Badler, N.I. (1996). Animating human locomotion with inverse dynamics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(2), 50-59
- Koenderink, J.J. (1999). Guest editorial. *Perception*, 28, 669-674
- Kolasinski, E. (1995). Simulator sickness in virtual environments. Technical Report 1027, United States Army Research Institute for the Behavioral and social sciences.
- Kosslyn, S.M., Pick, H.L Jr, Fariello, G.R. (1974). Cognitive map in children and men. *Child Development* 45, 707-716
- Kuipers, B. (1978). Modelling spatial knowledge. *Cognitive Science*, 2, 129-153
- Landy, M. S., Maloney, L.T., Johnston, E.B., Young, M. (1995) Measurement and modelling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, 35, 389-412.
- Larish, J.F., Flach, J.M. (1990). Sources of optical information useful for the perception of speed of rectilinear self-motion, *Journal of Exp. Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 295-302.
- Larish, J.F., Andersen, G.J. Active control in interrupted and dynamic spatial orientation. *Perception & Psychophysics*; 57(4); 533-545
- Levine, O.H., Mourant, R.R. (1996). Effect of visual display parameters on driving performance in a virtual environments driving simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40th Annual Meeting*, 1136-1140.
- Levine, O.H. (1995). Effect of visual display parameters on driving performance in a virtual environments driving simulator. Master Thesis, College of Engineering, Northeastern University Boston
- Levitt, H. (1970). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 467-477.
- Livingstone, M.S., Hubel, D.H. (1987). Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, 7, 3416-3468
- McKee, S.P., Silvermann, G.H., Nakayama, K. (1986). Precise velocity discrimination despite random variations in temporal frequency and contrast. *Vision Research* 26 (4), 609-619
- McKee, S.P., Welch, L. (1989). Is there a constancy for perceived velocity. *Vision Research*, 29, 553-561
- McKee S.P., Welch. L. (1992). The precision of size constancy. *Vision Research*, 32 (8), 1447-1460,
- McKee, S.P., Smallman, H.S. (1998). Size and speed constancy. In Walsh & Kulikowski (Eds.) *The Perceptual Constancies*, 373 – 408, C.U.P.
- McKenna, Zeltzer (1992). Three-dimensional visual display systems for virtual environments. *Presence*

- Mittelstaedt, M.L., Mittelstaedt, H. (1997). The effect of centrifugal force on the perception of rotation about a vertical axis. *Naturwissenschaften*, 84 (8), 366-69
- Mittelstaedt, H. (1999). The role of the otoliths in perception of the vertical and in path integration. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 871, 334-44
- Mochnatzki, H.F. (1999). Die Rolle von Hangneigungen beim Aufbau eines Ortsgedächtnisses: Verhaltensversuche in virtuellen Umgebungen. Diplomarbeit. Eberhard-Karls-Universität Tübingen
- Mochnatzki, H.F., Steck, S.D., Mallot, H.A. (1999). Geographic slant as a source of information in maze navigation. In Eslner & Eysel (Eds.) *Göttingen Neurobiology Report 1999, Volume II*, G. Thieme Verlag, Stuttgart, abstract #85
- Mon-Williams, M., Wann, J.P., Rushton, S. (1993). Binocular vision in a virtual world visual deficits following the wearing of a head-mounted display. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 13, 435-436
- Mon-Williams, M., Wann, J.P. and Rushton, S. (1996). Design factors in stereoscopic virtual-reality displays. *Journal of the Society for Information Display* 3, 207-210.
- Morgan, C.L., Zampi, G. (1995) *Virtual architecture*. London: B.T. Batsford Ltd
- Mortlock, A., Machin, D., McConnell, S., Sheppard P. (1997). Virtual Conferencing. *BT Technology Journal*, 15(4), 120-129
- Movshon, J.A., Newsome, W.T., Gizzi, M.S., Levitt, J. (1988). *Investigative Ophthalmology Visual Science* (suppl.), 29, 327
- Mühlberger, A., Hermann, M., Wiedemann, G., Pauli, P. (1999). Treatment of fear of flying by exposure in virtual reality. Manuscript submitted for publication.
- Nakayama, K. (1985). Biological image motion processing: A review. *Vision Research*, 25, 625-660
- Noma, H., Miyasato, T. (1998). Design for locomotion interface in large scale virtual environment (Atlas: ATR Locomotion Interface for Active Self Motion), *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers (ASME) Dynamic Systems and Control Division, DCS-Vol. 64*, ASME, New York, 1998, 111-118
- Norman, J.F., Todd, T.J., Perotti, V.J., Tittle, J.S. (1996). The visual perception of 3-D length. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 173-186.
- Ohta, H., Kamatsu, H. (1991). Speed perception in driving- comparison with TV observation. In Gale, Brown & Haslgrave (Eds.), *Vision in Vehicles III*, 415-426
- Okabe, A., Aoki, K., Hamamoto, W. (1986). Distance and direction judgement in a large-scale natural environment. Effects of slope and winding trail. *Environment and Behaviour*, 18(6), 755-772

- Osaka, N. (1988). Speed estimation through restricted field during driving in day and night: Naso-temporal hemifield differences. In A.G. Gale et al. (Eds.), *Vision and Vehicles II*, 45-55, Amsterdam, Elsevier
- Osaka, N. (1991). Effects of window size and eccentricity upon eye fixation and reaction time in negotiation of curves. In A.G. Gale et al. (Eds.), *Vision and Vehicles III*, 179-186, Amsterdam, Elsevier
- Owen, D.H., Wolpert, L., Warren, R. (1982). Effect of optic flow acceleration, edge acceleration, and viewing time on the perception of egospeed acceleration. In Owen (Ed.). *Optical flow and texture variables useful in simulating self motion (I)* (Interim Technical Report for Grant No. AFOSR-810078, D1,D32, Columbus, Ohio State University, Department of Psychology, Aviation Psychology Laboratory
- Owen, D.H., Wolpert, L., Warren, R. (1984). Effects of optical flow acceleration, edge acceleration, and viewing time on the perception of egospeed acceleration. In Owen (Ed.). *Optical flow and texture variables useful in detecting decelerating and accelerating self-motion*. Interim Technical Report, Columbus, Ohio State University, Department of Psychology, Aviation Psychology Laboratory
- Owen, D.H., Wolpert, L., Hettiger, L.J., Warren, R. (1984). Global optical metrics for self-motion perception. In *Proceedings of the 1984 Image II conference*, Phoenix, 406-415
- Pasternak, T., Merigan, W.H. (1994). Motion perception following lesions of the superior temporal sulcus in the monkey. *Cerebral Cortex* 4, 247-259
- Peli, E. (1995). Real vision virtual reality. *Optics Photonics News*
- Peruch, P., Gaunet, F. (1997). Virtual environments as a promising tool for investigating human spatial cognition. Accepted for publication in *Current Psychology of Cognition*.
- Previc, F.H. (1990). Functional specialization in the lower and upper visual fields in humans: Ist ecological origin and neurophysiological implications. *Behavioral and Brain Sciences*, 13, 519-575
- Potka, J., Lewis, S.A. (1995). Effects of field of view on judgements of self - location. Technical report on current FOV research (June 22, 1995)
- Potka, J., Lewis, S.A., King, D. (1998). Effects of field of view on judgement of self-position: Distortions in distance estimations even when the image geometry exactly fits the field of view. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 7(4),
- Reddy, M. (1997). Perceptually modulated level of detail for virtual environments. PhD thesis, University of Edinburgh
- Reddy, M., Watson, B., Walker, N., Hodges, L.F. (1997). Managing level of detail in virtual environments: A perceptual framework. *Presence* 6(6), 658-666
- Reichardt, W. (1957). *Zeitschrift für Naturforschung*, B12, 447

- Reichardt, W. (1973). Musterinduzierte Flugorientierung: Verhaltensversuche an der Fliege *Musca domestica*. *Naturwissenschaften*, 60, 122-138
- Reisbeck, T.E., Gegenfurtner, K.R. (1999). Velocity tuned mechanisms in human motion processing. *Vision Research*, 39(19), 3267-3285
- Richards, W. (1985). Structure from stereo and motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 343-349.
- Rheingold, H. (1995). *Virtuelle Welten – Reisen im Cyberspace*. Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbeck bei Hamburg.
- Rieke, B.(1998). Untersuchung des menschlichen Navigationsverhaltens anhand von Heimfindeexperimenten in virtuellen Umgebungen. Diplomarbeit. Eberhard-Karls-Universität Tübingen
- Rock, I., Hill, A.L., Fineman, M. (1968). Speed constancy as a function of size constancy. *Perception & Psychophysics*, 4, 37-40
- Rössler, A. (1995). Design validation: Using virtual prototypes for product design and product evaluation. In: Proceedings of “The best of German/American Automotive Technology”, Detroit, Ann Arbor: Fraunhofer USA
- Rogers, B.J., Collett, T.S. (1989). The appearances of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 41A 697-717
- Rohlf, J., Helman, J. (1994.). IRIS Performer: A high performance multiprocessing toolkit for real-time 3D graphics. *Siggraph '94 Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series* 1994, 381-394
- Rothbaum, B.O, Hodges, L.F., Kooper, R., Opdyke, D., Williford, J.S., North, M. (1995). Effectiveness of computer-generated (virtual-reality) graded exposure in the treatment of acrophobia. *American Journal of Psychiatric*, 152, 626-628
- Royden, C.S., Banks, M.S., Crowell, J.A. (1993). The perception of heading during eye movements. *Nature*; 365, 497-498
- Ruddle, R.A., Payne, S.J., Jones, D.M. (1997). Navigating buildings in „Desk-Top“ virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3, 143-159
- Rushton, S.K., MonWilliams, M., Wann, J.P. (1994). Binocular vision in a biocular world: New generation head mounted displays avoid causing visual deficit. *Displays*, 15, 255-260
- Satava, R.M. (1995). Medical applications of virtual reality. *Journal of Medical Systems*. 19(3), 275-80
- Schiff, W., Detwiler, M.L. (1979). Information used in judging impending collision. *Perception* 8 647-658.
- Schmidt R.F., Thews, G. (1995). *Physiologie des Menschen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 26. Auflage

- Schölkopf, B., Mallot, H.A. (1995): View-based cognitive mapping and path planning. *Adaptive Behavior* 3, 311-348
- Semb. G. , Scaling automobile speed, *Perception and Psychophysics* 5 (1969) 97-101.
- Sedgewick, H.A. (1986). Space Perception. In Boff, Kaufman & Thomas (Eds) *Handbook of Perception and Human Performance*. Vol Sensory Processes and Perception Wiley and Sons New York
- Sharp, A. (1979). *Bicycles Tricycles An elementary treatise on their design and constructions*. Fifth Printing, MIT Press Cambridge Massachusetts
- Siegel, A.W. (1981). The externalization of cognitive maps by children and adults: In search of ways to ask better questions. In L.S. Liben, A.H. Patterson & N, Newcombe (eds.), *Spatial representation and behavior across the life span: Theory and application*, 167-194, New York, Academic Press.
- Silicon Graphics, Inc. (1998). *Onyx2 Reality, Onyx2 InfiniteReality and Onyx2 InfiniteReality2 Technical Report*
- Singer, M.J., Allen, R.C., McDonald, D.P., Gildea, J.P. (1997). *Terrain Appreciation in virtual environments: Spatial knowledge acquisition*. Technical Report 1056, United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences
- Sivak, M., (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual. *Perception*, 25, 1081-1081
- Slater, M., Usoh, M., Steed, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2), 130- 144
- Smets,G.J.F., Overbeeke, K.J. (1995). Trade-off between resolution and interactivity in spatial task performance *IEEE computer Graphics and Applications*, 46-51
- Smith, A.T., Edgar, G.K. (1990). The influence of spatial frequency on perceived temporal frequency and perceived speed. *Vision Research*, 30 (19). 1467-1474
- Smith, A.T., Edgar, G.K. (1991). The separability of temporal frequency and velocity. *Vision Research*, 31 (2), 321-326
- Smith A T, Edgar G K, (1994). Antagonistic comparison of temporal frequency filter outputs as a basis for speed perception. *Vision Research*, 34, 253-265
- Snowden, R.J., Stimpson, N., Ruddle, R.A. (1998). Speed Perception Fogs up as visibility drops. *Nature*. 392 (6675),450
- Steck. S.D., Mallot, H.A. (1999). The role of global and local landmarks in virtual environment navigation. Accepted for publication in *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*
- Stewart, D., Cudworth, C.J., Lishman, J.R. (1993). Misperception of time-to-collision by drivers in pedestrian accidents. *Perception* 22, 1227-1244.
- Stone, L.S., Thompson, P. (1992). Human speed perception is contrast dependent. *Vision Research* 32 1535-1549.

- Sutherland, I.E. (1965). The Ultimate Display. Invited lecture, IFIP Congress 1965. In Kalenich (ed.) Information Processing 1965: Proceedings IFIP Congress 65, Vol.2 506-508, Spartan Books, Washington D.C. and Macmillan, New York
- Sutherland, I.E. (1970). Computer Displays Scientific American 222 (6), 57-81
- Szalavári, Z., Gervautz, M. (1997). The personal interaction panel – a two handed interface for augmented reality. In: Fellner & Szimary-Kalos (Eds.) Eurographics '97, Vol. 16(3)
- Szalavári, Z., Gervautz, M. (1998). Interaktion mit virtuellen Informationen in realen Umgebungen – das “Personal Interaction Panel”. In Rügge, Robben, Hornecker & Bruns (Eds.) Arbeiten und Begreifen: Neue Mensch-Maschine-Schnittstellen, LIT-Verlag Münster, 147-158
- Thorndyke, P.W., Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. Cognitive Psychology, 14, 560-589
- Tittle, J.S., Braunstein, M.L. (1991). Shape perception from binocular disparity and structure-from motion In Schenker (Ed.) Sensor fusion III: 3-D perception and recognition. Proceedings of the SPIE 1383 pp 225-234
- Thompson, P. (1982). Perceived rate of movement depends on contrast. Vision Research, **22**, 377-380.
- Thurrell, A. E. I., Pelah, A., Distler, H. K. (1998). The influence of non-visual signals of walking on the perceived speed of optic flow. Perception 27, Supplement, #147b
- Tolman, E.C. (1948). Cognitive maps in rats and men. Psychological Review 55, 189-208.
- Triggs, T, Berenyi, J.S. (1982). Estimation of automobile speed under day and night conditions. Human Factors, 24, 111-114
- Trullier, O., Wiener, S.I. , Berthoz, A., Meyer, J.-A. (1997). Biologically based artificial navigation systems. Review and Prospects, Progress in Neurobiology, 51, 483-544
- Vaitl, D., Mittelstaedt, H., Baisch F. (1997). Shifts in blood volume alter the perception of posture. International Journal of Psychophysiology, 27(2), 99-105
- van den Berg, A.V. (1992). Robustness of perception of heading from optic flow. Vision Research, 32 (7), 1285-96
- van Santen, J.P.H., Sperling, G. (1985). Elaborated Reichardt detectors. Journal of the Optical Society of America, A 2, 300-321
- van Veen, H.A.H.C, Distler, H.K., Braun, S.J., Bühlhoff, H.H. (1998). Navigating through a virtual city: Using virtual reality technology to study human action and perception. Accepted for publication in Future Generation Computer Systems.
- van Veen, H.A.H.C., Sellen, K., Bühlhoff, H.H. (1998). Pointing to invisible landmarks in real and virtual environments. Investigative Ophthalmology & Visual Science, Vol. 39 (4), #2910 (S625)
- Verghese, P., Stone, L. (1995). Combining speed information across space. Vision Research, 35 (29), 2811-2823

- Verghese, P., Stone, L. (1996). Perceived visual speed constraint by image segmentation. *Nature*, 381, 161-163
- Wallach, H. (1939). On the constancy of visual speed. *Psychophysical Review*, 46, 541-552
- Waller, D., Hunt, E., Knapp, D. (1998). The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence*, 7(2), 129-143
- Watamaniuk, S.N.J., Duchon, A. (1992). The Human visual system averages speed information. *Vision Research*, 32, 5, 931-941
- Waters, C.R., Anderson, D.B, Barrus, J.W., Brogan, D.C., Casey, M.A., McKeown, S.G., Nitta, T., Sterns, I.B., Yerazunis, W.S. (1997). Diamond park and spline: Social virtual reality with 3D animation, spoken interaction and runtime extendability. *Presence Teleoperators & Virtual Environment*, 6(4), 461-481
- Watson, A.B., Ahumada, A.J., (1985). Model of human visual-motion sensing. *Journal of the Optical Society of America*, A 2, 322-342
- Warren, R. (1982). Optical transformations during movement: Review of the optical concomitants of egospeed. Technical Report, Columbus, Ohio State University, Department of Psychology, Aviation Psychology Laboratory.
- Warren, R., Owen, D.H., Hettlinger, L.J (1982). Separation of the contributions of optical flow rate and edge rate on the perception of egospeed acceleration. In Owen (Ed.). *Optical flow and texture variables useful in simulating self motion (I)* (Interim Technical Report for Grant No. AFOSR-810078, D1,D32, Columbus, Ohio State University, Department of Psychology, Aviation Psychology Laboratory.
- Warren, W.H., Hannon, D.J. (1990). Eye movements and optical flow. *Journal of the Optical Society of America*, A7, 160-169
- Warren, W.H., Hannon, D.J. (1991). Perception of circular heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 28-43
- Warren, W.H. (1998). Perception of heading is a brain in the neck. *Nature Neuroscience*, 1(8), 647-649
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Wist, E.R., Diener, H.C., Dichgans, J., (1976). Motion constancy dependent upon perceived distance and the spatial frequency of the stimulus pattern. *Perception & Psychophysics*, 19, 485-491
- Witmer, B.G., Bailey, J.H., Knerr, B.W. (1996). Virtual spaces and real world places: Transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, 45, 413-428
- Witmer, B.G., Kline, P.B. (1998). Judging perceived and traversed distance in virtual environments. *Presence*, 7(2), 144-167

Wolpert, L. (1990). Field-of-view information for self-motion perception. In R. Warren, A.H. Wertheim (Eds.) Perception & Control of Self-motion, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, Hove and Landon

Zohary, E., Sittig, A.,C. (1993). Mechanisms of velocity constancy. Vision Research, 33, 2467-2478