

Untersuchung des menschlichen Navigationsverhaltens anhand von Heimfindeexperimenten in virtuellen Umgebungen

Diplomarbeit
in Physik,
Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

Angefertigt am
Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen

Betreuer:
Prof. Dr. H. Ruder,
Institut für Astronomie und Astrophysik, Tübingen
Prof. Dr. H. H. Bühlhoff und Dr. H. A. H. C. van Veen,
Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen

Erstellt von
Bernhard Riecke

31. Oktober 1998

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Einführung in die Navigationsforschung	15
2.1	Grundbegriffe der Navigationsforschung	16
2.1.1	Positionsbasierte Navigation	16
2.1.2	Geschwindigkeitsbasierte Navigation	16
2.1.3	Beschleunigungsbasierte Navigation	17
2.2	Navigationsforschung - allgemeiner Literaturüberblick	18
2.3	Dreiecksvervollständigung in realen Umgebungen	22
2.4	VU als Methode der Raumkognitionsforschung	23
2.4.1	Definition von “virtueller Realität” bzw. “virtuellen Umgebungen”	23
2.4.2	Virtuelle Umgebungen als Methode der Navigationsforschung	23
2.4.3	Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf	26
2.4.4	Verhältnis zwischen realer und virtueller Umgebung	27
2.4.5	Orientierung in simulierten Umgebungen	29
2.4.6	Dreiecksvervollständigung in virtuellen Umgebungen	31
2.5	Literaturüberblicks und Motivation	34
3	Überblick über die Experimente	37

4	Methoden	41
4.1	Interaktion - Versuchsumgebung und Simulationsanlage	41
4.1.1	Ausgabeeinheiten	41
4.1.2	Eingabemedien und Bewegungsmodell	43
4.2	Szenerien	46
4.2.1	Punktewolke	47
4.2.2	Stuhllandschaft	49
4.2.3	Stadtlandschaft	49
4.3	Software	52
4.4	Design des Experiments	53
4.5	Ablauf des Experiments	55
4.6	Versuchspersonen	60
5	Experimente: Motivation, Ergebnisse und Diskussion	61
5.1	Hauptexperiment	61
5.1.1	Motivation	61
5.1.2	Ergebnisse und Diskussion	62
5.2	Experiment 2 - Kontrollexperiment ohne Szenenwechsel	78
5.2.1	Motivation und Hypothesen	78
5.2.2	Methoden	78
5.2.3	Ergebnisse und Diskussion	80
5.3	Experiment 3 - Neues Fahrradmodell	85
5.3.1	Motivation	85
5.3.2	Hypothesen	85
5.3.3	Methoden	85
5.3.4	Ergebnisse und Diskussion	86
5.3.5	Strategie der Versuchsperson <i>betu</i> - Ergebnisse und Diskussion	89
5.4	Experiment 4 - Variation des Gesichtsfeldes	91
5.4.1	Motivation und Hypothesen	91
5.4.2	Methoden	91
5.4.3	Ergebnisse und Diskussion	92
5.5	Auswertung der Fragebögen - Verwendete Strategien	99

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	5
6 Allgemeine Diskussion	103
6.1 Bezug zur Dreiecksvervollständigungsliteratur	103
6.2 Einfluß der unabhängigen Parameter	105
6.3 Piloting versus Pfadintegration	107
A Detaillierte Darstellung der Versuchsergebnisse	109
A.1 Beispiele für Trajektorien	109
A.2 Hauptexperiment	112
A.3 Ergebnisse von Experiment 3 - Neues Fahrradmodell	123
A.4 Ergebnisse von Experiment 4 - Variation des FOV	126
B Versuchsanleitung und Fragebögen	131
B.1 Versuchsanleitung	131
B.2 Fragebogen zu Simulatorkrankheiten	134
B.3 Fragebogen zur "Präsenz"	136
B.4 Fragebogen zum Experiment	139
C Erklärung und Danksagung	143
Literatur	145

Abbildungsverzeichnis

2.1	Heimfindeverhalten von Ameisen - Trajektorien	20
2.2	Heimfindeverhalten der Wüstenameise <i>Cataglyphis fortis</i>	21
2.3	Virtual Reality Cube (VR-cube) nach Bülthoff et al., (1997).	25
2.4	Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf.	26
2.5	Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf in realen und virtuellen Umgebungen.	27
2.6	Virtuelle Versuchsumgebung in den Experimenten von Péruch et al. (1997)	31
4.1	VR Bike vor der 180° Projektionsleinwand	42
4.2	VR Bike	45
4.3	Die wesentlichen Komponenten des Fahrradsimulators.	46
4.4	Punktewolke.	48
4.5	Stuhllandschaft	50
4.6	Verschiedene Ansichten der Stadtlandschaft.	51
4.7	Nomenklatur des Dreiecks	54
4.8	Experimenteller Ablauf	56
4.9	Übersichtsbild auf separatem Monitor	58
5.1	Trajektorien für Maus und Fahrrad	63
5.2	Längenkompression	66
5.3	Winkelkompression	67
5.4	Gemittelte Verhaltensantworten im Hauptexperiment	68
5.5	Längen- und Winkelkompression im Hauptexperiment	70
5.6	Distanz- und Winkelfehler im Hauptexperiment	72
5.7	Längenkompression in den verschiedenen Szenerien	74

5.8	Distanz- und Winkelvarianz im Hauptexperiment	76
5.9	Trajektorien in Experiment 2	79
5.10	Gemittelte Homingleistung in Experiment 2	81
5.11	Distanz- und Winkelfehler in Experiment 2	82
5.12	Distanz- und Winkelvarianz in Experiment 2	83
5.13	Fehler und Variabilität in Distanz und Winkel in Experiment 3	87
5.14	Gemittelte Homingperformance in Experiment 3	88
5.15	Verhaltensantwort (beobachtete Trajektorien) der Versuchsperson <i>betu</i>	90
5.16	Distanz- und Längenfehler im FOV-Experiment	93
5.17	Distanz- und Winkelvarianz im FOV-Experiment	94
5.18	Distanz- und Winkelkompression im FOV-Experiment	95
A.1	Trajektorien für VR Bike	110
A.2	Trajektorien für Maus	111
A.3	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>anko</i> im Hauptexperiment.	113
A.4	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>felo</i> im Hauptexperiment.	114
A.5	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>hege</i> im Hauptexperiment.	115
A.6	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>math</i> im Hauptexperiment.	116
A.7	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>sime</i> im Hauptexperiment.	117
A.8	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>sthe</i> im Hauptexperiment.	118
A.9	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>anme</i> im Hauptexperiment.	119
A.10	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>chfl</i> im Hauptexperiment.	120
A.11	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>fezi</i> im Hauptexperiment.	121
A.12	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>gueb</i> im Hauptexperiment.	122
A.13	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>best</i> in Experiment 3.	124
A.14	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>miha</i> in Experiment 3.	125
A.15	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>best</i> im FOV-Experiment.	127
A.16	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>betu</i> im FOV-Experiment.	128
A.17	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>fezi</i> im FOV-Experiment.	129
A.18	Verhaltensantwort der Versuchsperson <i>math</i> im FOV-Experiment.	130
B.1	Versuchsanleitung	132

B.2	Versuchsanleitung	133
B.3	Fragebogen zu Simulatorkrankheiten (Motion Sickness Questionnaire)	135
B.4	Fragebogen zur “Präsenz” (Presence Questionnaire), nach Singer et al. (1997).	137
B.5	Fragebogen zur “Präsenz” (Presence Questionnaire), nach Singer et al. (1997).	138
B.6	Fragebogen zum Experiment	140
B.7	Fragebogen zum Experiment	141

Tabellenverzeichnis

4.1	Experimentelles Design des Hauptexperiments	53
5.1	<i>MANOVA</i> -Tabelle für Hauptexperiment	73
5.2	Experimentelles Design von Experiment 2	78
5.3	Experimentelles Design von Experiment 3	85
5.4	Experimentelles Design des FOV-Experiments	91

Kapitel 1

Einleitung

In der vorliegenden Arbeit beschreiben wir unsere Untersuchungen zum menschlichen Navigationsverhalten bei Pfadintegrationsaufgaben in virtuellen Umgebungen.

Uns interessierte dabei die mentale Repräsentation des Raumes und die bei der Orientierung in der Umwelt auftretenden Verarbeitungsschritte im menschlichen Gehirn. Um Einsichten in diese mentalen Prozesse des Menschen zu gewinnen analysierten wir dessen Verhaltensantworten¹ bei Navigationsaufgaben. Als Versuchsumgebung verwendeten wir speziell dafür entwickelte virtuelle Umgebungen. Dadurch war es einerseits möglich, das Navigationsverhalten genau aufzuzeichnen, andererseits erlaubte es die genaue Kontrolle der Stimuli; wir wußten also zu jedem Zeitpunkt genau, was die Versuchsperson wahrnehmen konnte und was nicht.

Wir untersuchten die bewegungsbegleitende Kodierung von Richtungs- und Distanzinformation in der mentalen räumlichen Repräsentation anhand von Heimfindaufgaben (“**homing**”). Dazu verwendeten wir ein als “**Dreiecksvervollständigung**” bekanntes Versuchsparadigma. Dabei werden zwei Schenkel eines Dreiecks vorgegeben, und die Startposition soll wiedergefunden werden. Konkret bestand die Navigationsaufgabe der Versuchspersonen darin, den Ausgangspunkt in der virtuellen Umgebung wiederzufinden, nachdem sie sich entlang eines vorgegebenen Weges aus zwei geradlinigen Segmenten von diesem entfernt hatten. Das Versuchsparadigma “*Dreiecksvervollständigung*” wurde in der Navigationsforschung zuerst bei Tieren und später auch bei Menschen vielfach angewandt, bisher jedoch meist in Feldstudien.

Durch die rasante Entwicklung der Technologie virtueller Realität (“*Virtual Reality*”, VR) in den letzten Jahren ist es möglich geworden, das bisherige Versuchsparadigma von realen Umgebungen auf den Bereich der Navigation in virtuellen Umgebungen zu übertragen und dadurch zu erweitern. Inwieweit sich Raumwissen und Navigationsstrategien aus realen Umgebungen auf virtuelle Welten übertragen lassen, und wie man die virtuelle Umgebung hierfür gestalten sollte, war ein weiterer Interessenschwerpunkt der vorliegenden Untersuchung.

¹Verhaltensantworten sind hier Bewegungsentscheidungen wie z.B. eine Drehung um 60° mit anschließender Vorwärtsbewegung um 40m.

Gliederung dieser Arbeit

Das folgende Kapitel enthält eine Einführung in die Navigationsforschung. Wir werden dabei auf Grundbegriffe und einige Untersuchungsmethoden der Navigationsforschung eingehen und einen kurzen Überblick über die für diese Arbeit relevante Literatur geben. Als Abschluß des Kapitels werden wir genauer auf die Charakteristika virtueller Umgebungen als Methode der Navigationsforschung eingehen.

Das darauffolgenden Kapitel 3 enthält einen Überblick über die einzelnen durchgeführten Experimente, deren Methodik dann in Kapitel 4 ausführlich dargestellt ist. Die Ergebnisse der verschiedenen Experimente werden in Kapitel 5 im Einzelnen dargestellt und diskutiert. In Kapitel 6 werden sie zusammenfassend diskutiert und mit den Ergebnissen anderer Experimente zur menschlichen Dreiecksvervollständigung verglichen.

In Anhang A werden die Daten der Experimente im Detail dargestellt, damit sich der geneigte Leser ein eigenes Bild der Verhaltensantworten der Versuchspersonen machen kann. In Anhang B sind die Versuchsanleitung und die verwendeten Fragebögen abgebildet.

Kapitel 2

Einführung in die Navigationsforschung

Stellen Sie sich vor, Sie haben in einer ihnen unbekanntem Umgebung ihren Schlüsselbund verloren. Sie hatten ihn eben noch gehabt, sind dann weitergegangen und wollen nun zum Ausgangspunkt zurück, wo sie ihren Schlüssel liegen gelassen haben. Was geht in Ihnen vor, während sie versuchen, zum Ausgangspunkt zurückzufinden (sog. **“homing”**-Problem)? Wie sieht ihre mentales Modell der Umgebung aus, gleicht es eher einer Landkarte (sog. **“kognitive Karte”**) oder merken sie sich bevorzugt Bewegungsentscheidungen an markanten Orientierungspunkten (**“Routenwissen”**)? Was haben sie von ihrer Umgebung im Gedächtnis behalten, während sie sich durch sie bewegten? Welche Orientierungspunkte sie sich gemerkt haben, hängt sicher von deren Auffälligkeit (**“Salienz”**) ab, aber auch von der Bedeutung, die Sie ihnen beimessen: So ist eine Tankstelle für Autofahrer ein wichtiger Orientierungspunkt, für einen Fahrradfahrer aber eher uninteressant. Wurde das Raumwissen in der Beobachterperspektive (**“egozentrisch”**) oder beobachterunabhängig (**“allozentrisch”** oder **“geozentrisch”**) abgespeichert?

An solchen und ähnlichen Fragestellungen ist die Raumkognitionsforschung, speziell die Navigationsforschung interessiert. Als Forschungsrichtung ist sie inhärent interdisziplinär, ihre Methoden entlehnen sich unter anderem aus der Psychologie, Neurobiologie, Biologie, Physik und Informatik.

Einen Grundstein der modernen Raumkognitionsforschung legte Tolman (1948). Von ihm stammt der inzwischen geläufige Begriff der **“kognitiven Karte”**, der sich auf eine mentale Repräsentation von Raumwissen in Form von Überblickswissen bezieht, welche das finden neuer Abkürzungen ermöglicht. Siehe auch O’Keefe & Nadel (1978) für eine Abgrenzung kognitiver Karten gegenüber einfachem Routenwissen. In den letzten Jahrzehnten gab es eine große Anzahl von Studien zur Struktur und Erwerb von Raumwissen, wobei verschiedene Forschungsrichtungen unterschiedliche Forschungsmethoden und Ergebnisse beitrugen.

Bevor wir auf die für unsere Arbeit relevanten Forschungsergebnisse in der Literatur eingehen, möchten wir einige zum besseren Verständnis nötigen Grundbegriffe der Navigationsforschung einführen.

2.1 Grundbegriffe der Navigationsforschung

An Orientierung im Raum und Navigation sind eine Reihe verschiedener Prozesse beteiligt. Dazu gehört die Aktualisierung der momentane Position und Orientierung während der Fortbewegung, aber auch der Erwerb und die Benutzung von Repräsentationen der Umgebung durch die wir uns bewegen. Solche Repräsentationen können aus mentalen Modellen bestehen, aber auch aus (externen) Karten, Photos, dreidimensionalen Modellen etc. Diese Informationen werden benötigt, um unter bestimmten Nebenbedingungen Routen planen und ausführen zu können. Mögliche Nebenbedingungen sind die Minimierung der benötigten Energie und Zeit oder das Finden des kürzesten und sichersten Weges.

Um die verschiedenen Methoden zur Aktualisierung der Position und Orientierung in der Umwelt analysieren zu können, wollen wir sie hier nach der Art der verwendeten Information kategorisieren: Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung, wobei vom Menschen zweifellos alle drei Informationsquellen genutzt werden (siehe Gallistel (1990) für eine Einführung).

2.1.1 Positionsbasierte Navigation

Positionsbasierte Navigation, auch **“Piloting”** oder **“Pilotage”** genannt, beruht auf exterozeptiver Informationen, aus denen die momentane Position und Orientierung bestimmt werden kann. Als Informationsquellen können verschiedene Arten von Orientierungshilfen oder **“Landmarken”** dienen, die wir im folgenden kurz beschreiben wollen.

“Landmarken” sind distinkte, stationäre und saliente (hervorstechende) Objekte oder Reize, die als Referenzpunkte dienen können (Werner, Krieg-Brückner, Mallot, Schweizer, & Freksa, 1997).

Unter **“globalen Landmarken”** versteht man nach einer Definition von Steck & Mallot (1998) weit- hin sichtbare Landmarken, die einen globalen (allozentrischen) Bezugsrahmen definieren, also kompaßähnliche Funktion haben. Explizite Richtungsinformationen (**“Kompass”**) können z.B. durch Magnetfeldrichtung, Himmelpolarisation, Sonnenstand, Sterne oder neuerdings auch durch GPS² gegeben sein.

Landmarken, die nur aus kurzer Distanz sichtbar sind, werden nach Steck & Mallot (1998) als **“lokale Landmarken”** bezeichnet. Mit ihnen sind häufig Bewegungsentscheidungen assoziiert, wie etwa **“vor der Kirche links abbiegen”**.

2.1.2 Geschwindigkeitsbasierte Navigation

Geschwindigkeitsbasierte Navigation, auch **“dead reckoning”** genannt, basiert auf der Positionsbestimmung durch Aufintegration des Geschwindigkeitsvektors (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 1982). Als

¹exterozeptive Reize sind von außen kommende, durch die Sinnesorgane wahrgenommene Reize, im Gegensatz zu propriozeptiven, durch den eigenen Körper vermittelten Reizen.

²Global Positioning System: Satellitengestütztes System zur globalen Positionsbestimmung.

Informationen zur Bestimmung des momentanen Geschwindigkeitsvektors können exterozeptive Reize dienen, wie das optische und akustische Flußfeld oder der Luftzug, aber auch propriozeptive Reize wie die Muskelanstrengung zur Konstanthaltung einer bestimmten Geschwindigkeit beim Fahrradfahren.

2.1.3 Beschleunigungsbasierte Navigation

Bei Verwendung der beschleunigungsbasierten Navigation (gelegentlich auch **“inertial navigation”** genannt) werden relative Orientierung und Position bezüglich des Ausgangspunktes durch zweifache Aufintegration der Rotations- bzw. Translationskomponente der Beschleunigung gewonnen. Als Reize können neben exterozeptiven Informationen auch propriozeptive und insbesondere vestibuläre Informationen dienen. Dadurch ist beschleunigungsbasierten Navigation möglich ohne Verwendung externer Signale.

Ein Beispiel für solches Verhalten gibt die Studie von Berthoz, Israël, Georgesfrancois, Grasso, & Tsuzuku (1995), in der die Speicherung raumzeitlicher Bewegungsmuster untersucht wurde. Versuchspersonen wurden mit verbundenen Augen passiv (auf einem kleinen vierrädrigen Roboter sitzend) geradlinig bewegt und sollten anschließend die Bewegung reproduzieren, indem sie den Roboter nun selbst steuerten. Es zeigte sich, daß die passive Bewegung mit einem annähernd korrekten Geschwindigkeitsprofil reproduziert werden konnte, unter der alleinigen Benutzung vestibulärer und propriozeptiver Reize. Ohne jegliche exterozeptive (visuelle, akustische...) Reize ist somit eine stete Aktualisierung der internen Repräsentation von Position und Orientierung in Raum möglich.

Geschwindigkeits- und beschleunigungsbasierte Navigation zusammen werden meist als **“Pfadintegration”** bezeichnet (Gallistel, 1990). Beiden Navigationsmethoden ist gemein, daß sie durch die Aufintegration des Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsvektors zu Akkumulationsfehlern neigen, also für größere Distanzen ungenau werden. Deswegen ist Pfadintegration, die lokal sehr genau sein kann, über größere Distanzen hinweg auf eine Korrektur durch Piloting angewiesen, das als einzige Methode frei von Akkumulationsfehlern ist.

Neben der geschwindigkeits- und beschleunigungsbasierten Informationen ist auch die Verwendung der dritten und ggf. noch höherer Ableitungen des Ortsvektors nach der Zeit denkbar (**“jerk-based navigation”**). Während der Beschleunigungs- und Abbremsphase beim Autofahren dürfte die propriozeptive und vestibuläre Wahrnehmung der Beschleunigungsänderung eine wichtige Rolle spielen. Ob die Wahrnehmung der Beschleunigungsänderung auch für die primär visuelle Navigation relevant ist, die wir hier untersuchen wollen, ist zumindest fraglich.

Für einen Überblick über egozentrische und allozentrische Formen der räumlichen Repräsentation sowie Definitionen von in der Raumkognitionsliteratur häufig vorkommenden Termini, siehe Klatzky (1998).

Im folgenden wollen wir einige interessante Ergebnisse aus verschiedenen Bereichen der Navigationsforschung schlaglichtartig beleuchten.

2.2 Navigationsforschung - allgemeiner Literaturüberblick

Die Neurobiologie stellt die Frage nach der neuronalen Repräsentation von Raumwissen und nach den bei der Navigation auftretenden neuronalen Prozessen. An Tieren durchgeführte Experimente bedienen sich meist elektrophysiologischer Ableitungen einzelner oder mehrerer Neuronen und Läsionsstudien. O'Keefe & Dostrovsky (1971) fanden bei elektrophysiologischen Untersuchungen am Hippocampus von Ratten erstmals Hinweise auf sogenannte **“place cells”**, die stets feuern, wenn sich das Tier an einer bestimmten Position im Raum, dem **“place field”**, aufhält, unabhängig von der momentanen Orientierung (siehe O'Keefe & Nadel (1978) für einen Überblick). Taube, Muller, & Ranck (1990a, 1990b) fanden ebenfalls an Ratten Indizien für orientierungssensitive Neuronen, sogenannte **“head direction cells”**. Diese feuern, wenn der Kopf eine bestimmte allozentrische Raumorientierung einnimmt, unabhängig von momentanen Bewegungen und der Erkennbarkeit von Landmarken. Als Informationsquellen dienen dabei vestibuläre und motorische Reize (Taube, 1998). Es wird vermutet, daß diese orientierungssensitiven Neuronen als eine Art interner Kompaß dienen.

In jüngster Zeit wurden durch die Entwicklung bildgebender Verfahren wie PET³ und fMRI⁴ nichtinvasive Untersuchungen am Menschen möglich. Die Analyse von Gehirnaktivität während Navigationsexperimenten in virtuellen Umgebungen (VU) ergaben, daß auch beim Menschen der Hippocampus für die Raumkognition eine wesentliche Rolle spielt (Maguire, Frith, Burgess, Donnett, & O'Keefe, 1998b; Maguire, Burgess, Donnett, Frackowiak, Frith, & O'Keefe, 1998a; Epstein & Kanwisher, 1998). Da beim Menschen elektrophysiologische Untersuchungsmethoden nicht vertretbar sind, und die Auflösung bildgebender Verfahren mit $\approx 1 \text{ mm}$ wesentlich über der Größe einzelner Neuronen liegt, kann bisher nur darüber spekuliert werden, ob auch im menschlichen Gehirn place cells und head direction cells existieren.

Einen eher theoretischen Ansatz verfolgten Samsonovich & McNaughton (1997) und McNaughton, Barnes, Gerrard, Gothard, Jung, Knierim, Kudrimoti, Qin, Skaggs, Suster, & Weaver (1996), indem sie ein neuronales Netz aus kontinuierlichen Attraktoren in einer Computersimulation implementierten. Eine Grundidee des Modells besagt, daß Konglomerate (**“charts”**) von place cells einen zweidimensionalen Attraktor (**“attractor map”**) bilden, welcher räumliche Koordinaten in beliebigen Umgebungen repräsentieren kann. Das Feuern einer place cell kann so als kooperativer Effekt der aktiven benachbarten Neuronen im selben, gerade aktiven **“chart”** verstanden werden. Demnach werden externe Objekte und Ereignisse nicht durch einzelne place cells repräsentiert, sondern durch Aktivitätsmuster von charts. Durch das Modell konnten viele erstaunliche Befunde über Aktivitätsmuster von hippocampalen place cells erklärt werden; gleichzeitig erlaubte es verifizierbare Prognosen.

Einen mathematisch-physikalischen Ansatz der Raumkognitionsforschung verfolgte Yoshino (1991). Er entwickelte ein mathematisches Modell zur optimalen Repräsentation von Raumwissen unter biologischen und physikalischen Nebenbedingungen. Die Nebenbedingungen ergeben sich einerseits

³Positron Emission Tomography

⁴Funktionelle Kernspintomographie oder functional Magnetic Resonance Imaging

aus Einschränkungen des Gehirns, wie limitierter Speicherkapazität und Verarbeitungsgeschwindigkeit, andererseits aus Einschränkungen der physikalische Umgebung an die Raumkognition. Mit der von ihm entwickelten "String-Geometrie" zur formalen Beschreibung von Raumwissen läßt sich eine optimale Struktur einer kognitive Karte zum effizienten Erwerb von Raumwissen mathematisch fassen.

Ein in der biologisch motivierten Robotik und Informatik verfolgter Ansatz ist, Modelle und Verhaltensweisen von der Natur "abzuschauen" und in Robotern bzw. Simulationen zu implementieren. Durch Simulationen und Implementationen lassen sich jedoch auch theoretische Modelle zu Navigationsmechanismen und zu Erwerb und Verarbeitung von Raumwissen testen und verfeinern. Ein klassisches Beispiel für die Implementierung eines einfachen Algorithmus zur Navigation sind die von Braitenberg (1984) entwickelten Vehikel. Diese Vehikel zeigen trotz ihrer extrem simplen Verschaltung erstaunlich komplexes Navigationsverhalten, das an natürliche Lebewesen erinnert.

In der Biologie gibt es eine lange Tradition der Navigationsforschung. (Für einen Überblick siehe Galistel (1990)). So entstanden zahlreiche Modelle zur Navigation und Raumrepräsentation bei Tieren als auch Menschen (für einen Überblick siehe Trullier, Wiener, Berthoz, & Meyer (1997)).

In Bezug zu der hier vorliegenden Arbeit sind vor allem die Untersuchungen zu den verschiedenen Modellen der Navigation (verschiedene Modelle zu Pfadintegration und Piloting) und den mentalen Repräsentationen von Raumwissen (Routenwissen versus kognitiver Karte, egozentrische versus allozentrische mentale Repräsentation etc.) von Interesse (Bennett, 1996; Benhamou & Poucet, 1995; Benhamou, 1997). Typischerweise werden dabei Verhaltensstudien an navigierenden Tieren durchgeführt.

Ein prominenter Fall ist die Untersuchung des Navigationsverhaltens der Wüstenameise Genus *Cataglyphis* (Müller & Wehner, 1988; Wehner, Michel, & Antonsen, 1996). Sie hat die Fähigkeit, auf direktem Weg zu ihrem Nest zurückzufinden, nachdem sie sich auf einem gewundenen Pfad von diesem entfernt hat (s. Abb 2.1, links), obwohl es in der kargen Wüstenlandschaft kaum Orientierungshilfen gibt. Duftspuren würden durch die Hitze nur kurze Zeit überdauern, und weithin sichtbare Orientierungspunkte existieren praktisch nicht. Die einzigen globalen Orientierungshilfen sind der Sonnenstand und die Polarisationsrichtung des Himmels, die die Ameise über ihre Polarisationsdetektoren wahrnehmen kann. Um zu überprüfen, ob die Ameisen tatsächlich außer dem Sonnenstand bzw. der Himmelpolarisation keine weiteren Landmarken benötigen, wurden sie an einen anderen Ort transportiert, bevor sie zum Nest zurückfinden sollten (Müller & Wehner, 1988). Die Ameisen ließen sich dadurch nicht beirren und liefen auf direktem Weg dorthin, wo in der alten Umgebung ihr Nest gewesen wäre. Sie benützten also den Sonnenstand als Orientierungshilfe und hatten eine Vorstellung über die genaue Entfernung zum Nest.

Eine gängige Theorie besagt, daß die Wüstenameisen im wesentlichen **Pfadintegration** als Navigationsmechanismus benutzen, also en route die gelaufenen Distanzen und gedrehten Winkel aufintegrieren, ohne hierfür externe Reize zu benötigen (s. S. 17). Da diese Methode zu Akkumulationsfehlern neigt, wird sie durch den Himmelskompaß und die spärlichen Orientierungspunkte ergänzt

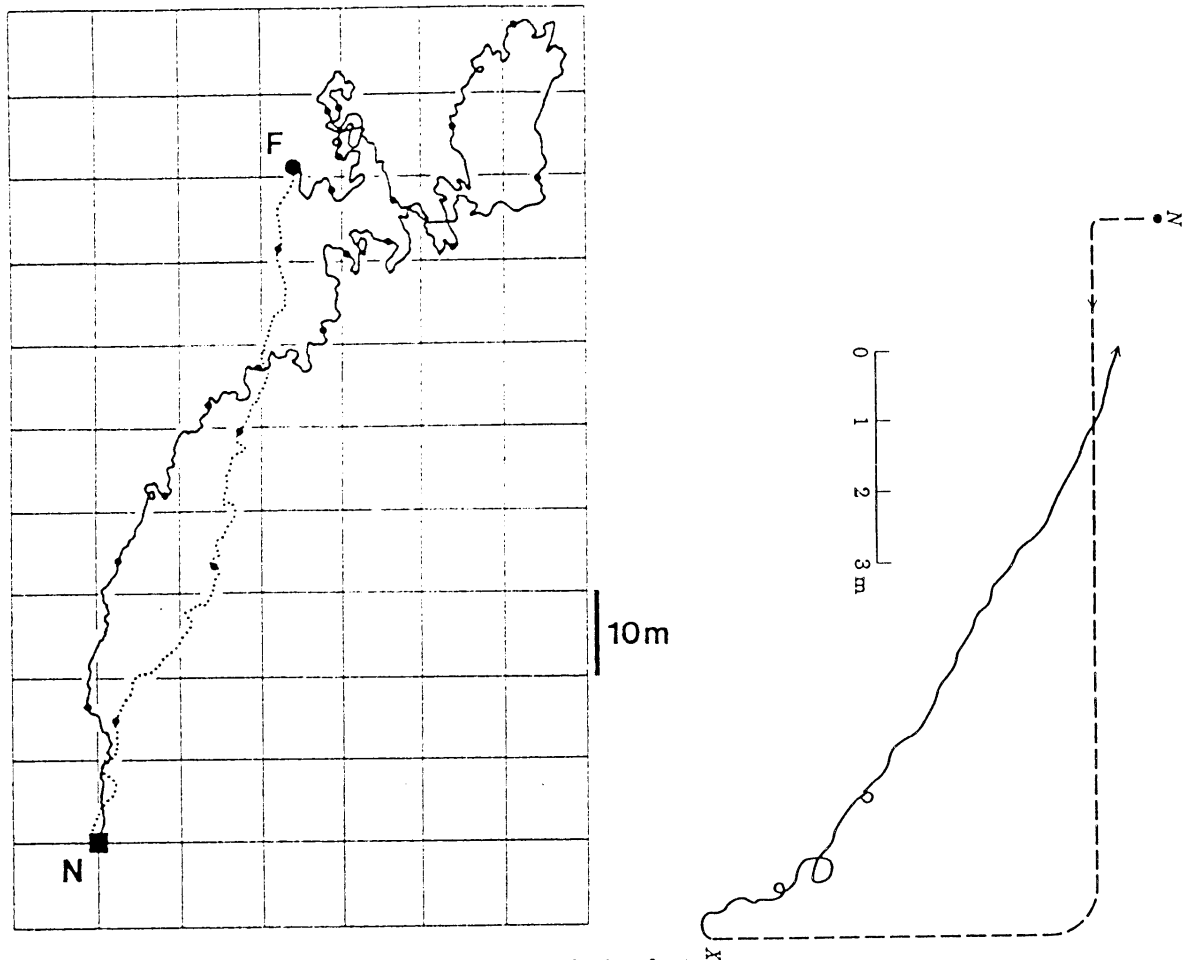


Abbildung 2.1: Beispiele für Heimfindeverhalten von Ameisen.

Links die Futtersuche von *Cataglyphis fortis*, dargestellt als durchgezogene Linie von 350m Länge, und der Rückweg (gepunktete Linie von Futterstelle F zum Nest N). Abbildung aus Müller & Wehner (1988).

Rechts der Rückweg von *Formica sanguinea* nach einer dreiecksförmigen geführten Exkursion durch den Experimentator (nach Brun (1915)). An beiden Trajektorien zeigt sich die Fähigkeit von Ameisen, nach einer Exkursion direkt zum Nest zurückzufinden.

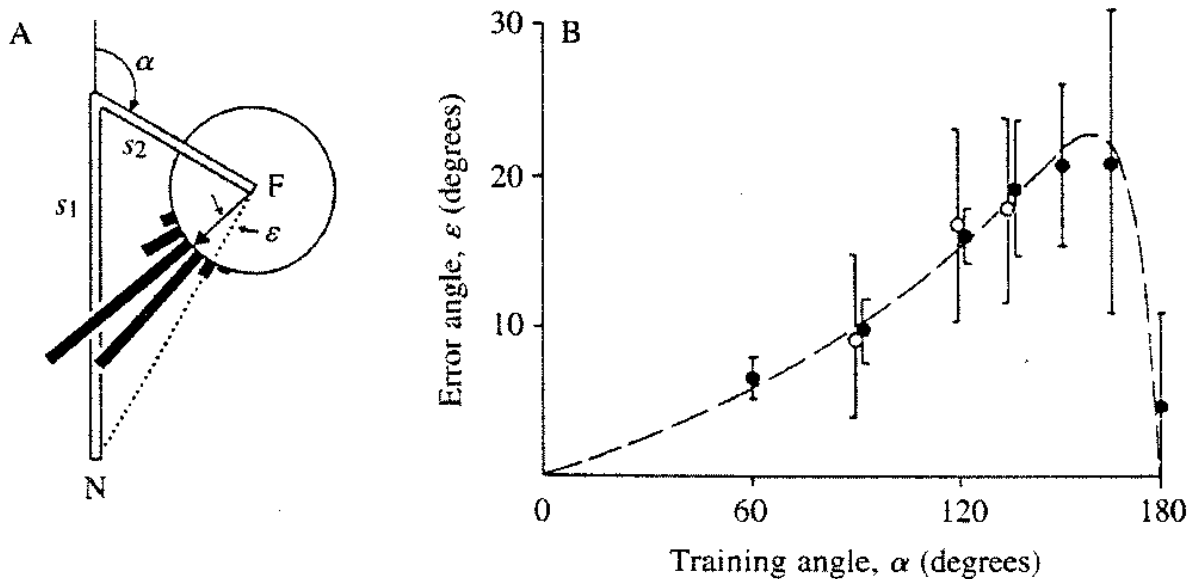


Abbildung 2.2: Heimfindeverhalten der Wüstenameise *Cataglyphis fortis* (aus Müller & Wehner, 1988).

Links: Ameisen wurden trainiert, entlang der beiden Dreiecksschenkel s_1 und s_2 vom Nest (N) zur Futterstelle (F) zu laufen. Dann wurden sie bei F gefangen und in eine freie Testumgebung ausgesetzt, wo sie versuchten, direkt zum Ausgangspunkt zurückzulaufen.

Rechts: Mittelwerte und Standardabweichungen für verschiedene Winkel α für 1412 Versuche. Die gestrichelte Linie stellt die Vorhersagen eines einfachen nichttrigonometrischen Modells zur Integration des Heimvektors dar, der "distance-weighted mean-direction hypothesis". Daten und Modell von Müller & Wehner (1988). Deutlich sichtbar ist die Tendenz, bei F zu weit zu drehen und so den Ausgangspfad zu kreuzen.

(Wehner et al., 1996; Etienne, Maurer, & Séguinot, 1996). Dabei wird vermutet, daß *Cataglyphis* als Rettungsanker stets den sogenannten **Heimvektor** im Gedächtnis behält, den Verbindungsvektor zwischen ihrer momentanen Position und ihrem Ausgangspunkt (ihrem Nest). Dadurch ist keine komplexe kognitive Karte nötig, um jederzeit zum Ausgangspunkt zurückfinden zu können; ein einfacher Heimvektor genügt⁵ (Bennett, 1996). Dennoch ist erstaunlich, daß Tiere mit einem so kleinen Gehirn wie dem der Wüstenameise gewisse geometrische "Kalkulationen" durchführen können, die für das Finden von Abkürzungen nötig sind.

Bei Experimenten zur Dreiecksvervollständigung und anderen Homingleistungen wurden sowohl statistische als auch systematische Fehler gefunden. Ein bei verschiedenen Spezies gefundener systematischer Fehler ist, daß nicht der direkte und damit kürzeste Rückweg bevorzugt wird. Statt dessen wird am Ende des zweiten Segments typischerweise zu weit gedreht, so daß der Rückweg das erste Segment kreuzt (s. Abb. 2.1, rechts und Abb. 2.2). Die gängigste Erklärung hierfür ist, daß die Tiere dadurch potentiell ihre eigene Fährte erkennen und dadurch die Wahrscheinlichkeit erhöhen, wie-

⁵Der Heimvektor kann als minimalste Form von Überblickswissen im Sinne einer kognitiven Karte aufgefaßt werden (Loomis et al., 1993).

der an den Ausgangspunkt (ihr Nest) zurückzufinden. Dieser “systematische Fehler” stellt also ein Sicherheitsmaßnahme dar. Ähnliche Verhalten wurde auch für Spinnen (Görner, 1958), Bienen (Bisetzky, 1957), Hamstern (Seguinot, Maurer, & Etienne, 1993) und Hunden (Séguinot, nicht publiziert, erwähnt in Etienne et al. (1996)) gefunden.

Von den zahlreichen Studien zur menschlichen Raumkognition und Navigation möchten wir im folgenden die Arbeiten erwähnen, die einen direkten Bezug zur vorliegenden Arbeit haben. In Kapitel 2.3 werden wir auf Dreiecksvervollständigungsexperimente in realen und virtuellen Versuchsumgebungen eingehen, in Kapitel 2.4 auf Navigationsexperimente in virtuellen Umgebungen allgemein und deren Methodik.

2.3 Dreiecksvervollständigung in realen Umgebungen

Sauvé (1989), Klatzky, Loomis, Golledge, Cicinelli, Pellegrino, & Fry (1990) und Loomis, Klatzky, Golledge, Cicinelli, Pellegrino, & Fry (1993) führten Untersuchungen zum Heimfindeverhalten an Versuchspersonen mit verbundenen Augen und an Blinden durch. Ähnlich den Experimenten zur Dreiecksvervollständigung bei der Wüstenameise *Cataglyphis* mußten auch hier die Versuchspersonen auf möglichst direktem Wege zum Ausgangspunkt zurückkehren, nachdem sie entlang zweier geradliniger Wegsegmente von ihm fortgeführt wurden. Die bei Tieren generell beobachtete Tendenz, an der zweiten Ecke des Dreiecks zu weit zu drehen und dadurch das erste Segment zu kreuzen wurde von Klatzky et al. (1990) und Loomis et al. (1993) nicht beobachtet. In der Studie von Sauvé (1989) wurde nur dann ein Überdrehen beobachtet, wenn der zweite Dreiecksschenkel mit 5 m kürzer war als der erste Dreiecksschenkel mit 7 m. War er hingegen länger (10 m), so war der Drehwinkel korrekt, jedoch war der gelaufene Rückweg zu kurz.

Klatzky et al. (1990) und Loomis et al. (1993) fanden eine Tendenz hin zum Mittelwert in den Verhaltensantworten: Für “kleine” Drehwinkel ($< 90^\circ$) wurde zu weit gedreht, für “große” Drehwinkel ($> 90^\circ$) nicht weit genug. Die gleiche Kompression der Verhaltensantwort zeigte sich für die gelaufenen Distanzen. Zum besseren Verständnis dieser Befunde entwickelten Fujita, Klatzky, Loomis, & Golledge (1993) ein Modell, welches Rückschlüsse über die der Dreiecksvervollständigung zugrundeliegenden mentalen Repräsentation erlaubt. Dieses **Kodierfehlermodell** (“**encoding-error model**”) nimmt an, daß sie Versuchsperson Drehwinkel und gelaufene Distanzen abspeichern, jedoch mit einem systematischen Fehler: Werte kleiner als der Mittelwert werden als zu groß abgespeichert, relativ große Werte werden kleiner als ihr tatsächlicher Wert abgespeichert. Dadurch ergibt sich die beobachtete Verschiebung hin zum Mittelwert. In Kapitel 6.1 werden wir genauer auf das Kodierfehlermodell eingehen und diskutieren, weshalb es sich entgegen unseren Erwartungen nicht auf unsere Versuchsdaten anwenden läßt.

Eine der Schlußfolgerungen, die Klatzky et al. (1990) und Loomis et al. (1993) aus ihren Experimenten zogen, ist die Ablehnung der Hypothese, daß beim Navigieren ohne Sicht nur der Heimvektor

aktualisiert würde (Fujita, Loomis, Klatzky, & Golledge, 1990; Müller & Wehner, 1988). Stattdessen vermuten sie die Existenz von Überblickswissen (survey knowledge) in Form einer kognitiven Karte. Diese Hypothese basiert im wesentlichen auf zwei Befunden: Einerseits stieg der absolute Fehler in der Winkel- und Distanzantwort, wenn sich die Komplexität des Weges erhöhte, indem anstatt der zwei Schenkeln des Dreiecks ein Polygonzug mit mehr als zwei Segmenten verwendet wurde. Andererseits war der relative Fehler weitgehend unabhängig von der Skalierung des Polygonzugs, hing jedoch von der absoluten Größe der Drehwinkel ab, was eine skaleninvariante, bildartige mentale Repräsentation nahelegt (Klatzky et al., 1990). Zudem waren Versuchspersonen in der Lage, sowohl den kürzesten Rückweg zu finden als auch denselben Weg zurückzuerfolgen. Dies ist inkonsistent mit der ausschließlichen Verwendung eines Heimvektors, der ja keine Information über die einzelnen gelaufenen Wegsegmente enthält, sondern nur die momentane Richtung und Entfernung zum Ausgangspunkt angibt.

Zwischen den drei Versuchsgruppen (von Geburt an Blinde, später Erblindete und normalsichtige Versuchspersonen mit verbundenen Augen) konnten Loomis et al. (1993) keinen signifikanten Unterschied feststellen.

Loomis, Da Silva, Philbeck, & Fukusima (1996), Loomis, da Silva, Fujita, & Fukusima (1992) und Fukusima, Loomis, & Da Silva (1997) untersuchten die visuelle Wahrnehmung von egozentrischen Distanzen, also dem Abstand zwischen Beobachter und einem Punkt im Raum. Als Untersuchungsmethode verwendeten sie zwei Triangulationsmethoden: In einer **“triangulation-by-pointing”**-Prozedur sieht die Versuchsperson in einer bestimmten Distanz ein Ziel und versucht anschließend, mit geschlossenen Augen kontinuierlich in Richtung des Zieles zu zeigen, während sie auf gerader Linie an ihm vorbeigeht. In dem **“triangulation-by-walking”**-Verfahren sieht die Versuchsperson das Ziel und läuft dann auf gerader Linie schräg am Ziel vorbei. Auf ein Signal des Experimentators hin dreht sich die Versuchsperson in Richtung des Zieles und läuft, immernoch mit geschlossenen Augen, einige Schritte in dessen Richtung. Mit beiden Untersuchungsmethoden ergab sich, daß unter normalen Sichtverhältnissen egozentrische Distanzen bis 15 m korrekt wahrgenommen werden. Für Distanzen größer als 15 m fanden Fukusima et al. (1997) eine leichte Unterschätzung.

Im folgenden Kapitel wollen wir zum besseren Verständnis generelle Charakteristika virtueller Umgebungen als Paradigma der Raumkognitionsforschung erläutern um danach auf einige Navigationsstudien in virtuellen Umgebungen einzugehen.

2.4 Virtuelle Umgebungen als Methode der Raumkognitionsforschung

2.4.1 Definition von “virtueller Realität” bzw. “virtuellen Umgebungen”

Virtuelle Umgebungen (VU) bzw. **Virtual Reality** (VR) lassen sich definieren über die Schnittstelle zwischen dem Menschen und einer computergenerierten Umgebung, die es dem Menschen erlaubt, in Echtzeit mit einer egozentrisch definierten Simulation einer 3D Umgebung zu interagieren. Neben der

typischerweise verwendeten visuellen Simulation kann VR auch andere Sinnesmodalitäten umfassen: Auditorisch, propriozeptiv, taktil, olfaktorisch, gustatorisch etc.

VR verwendet typischerweise hochentwickelte Ein- und Ausgabegeräte wie Projektionsleinwände, Datenbrillen (Head Mounted Displays, HMD), 2D und 3D Mäuse, Joysticks, Datenhandschuhe, Positionstracker etc. (siehe Burdea, Richard, & Coiffet (1996) für einen Überblick über VR-spezifische Ein- und Ausgabegeräte). Um vom momentanen Stand der Technologie unabhängig zu sein sollte vermieden werden, VU und VR über die technische Implementation des Interfaces zu definieren (Burdea & Coiffet, 1994).

2.4.2 Virtuelle Umgebungen als Methode der Navigationsforschung

Forschungsmöglichkeiten und -ergebnisse eines Forschungsbereiches sind stets eng verknüpft mit der verwendeten Methodik und Technologie. Technologische Fortschritte können so über eine Erweiterung der verwendbaren Untersuchungsmethoden zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen führen, die mit den herkömmlichen Methoden noch nicht zu erreichen waren. Dieser Prozeß ist auch in der Navigationsforschung erkennbar, wo die Entwicklung der Technologie virtueller Umgebungen die Beschränkungen der herkömmlichen Untersuchungsmethoden zu überwinden hilft.

Um die verschiedenen experimentellen Ansätze zur Erforschung der Leistung der menschlichen Informationsverarbeitung miteinander zu vergleichen, bedienen wir uns des sog. Virtual Reality-Würfels (VR-cube), siehe Abb. 2.3. Dafür trägt man deren Charakteristika entlang der drei Dimensionen des Würfels - Kontrollierbarkeit, Interaktivität und Realismus - auf⁶.

Interaktivität

Einerseits basieren herkömmlichen Untersuchungsmethoden räumlichen Verhaltens meist auf statischen, nicht interaktiven Meßgrößen. Beispiele hierfür sind die Analyse von Personenbefragungen, Distanz- und Richtungsschätzungen sowie Kartenzeichnen (siehe Evans (1980) für einen Überblick). Es ist nicht trivial, ob sich die so gefundenen Ergebnisse auf reale Situationen übertragen lassen, in denen man z.B. versucht, sich (naturgemäß interaktiv) in einer unbekanntem Stadt zurechtzufinden.

Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit

Andererseits ergab sich bei den bisher üblichen Feldexperimenten oft das Problem der Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen. So hängt das Ergebnis eines Navigationsexperiments in einer realen Umgebung von zahlreichen Faktoren ab, die außerhalb der Kontrollmöglichkeiten des Experimentators liegen. Dazu gehören einerseits Eigenschaften der Umgebung wie etwa

⁶Siehe z.B. Zeltzer (1992) für eine alternative Definition des VR-Cube; er verwendete anstatt der Dimensionen Kontrollierbarkeit, Interaktivität und Realismus die Dimensionen Autonomie, Interaktion und Präsenz (sog. AIP-cube).

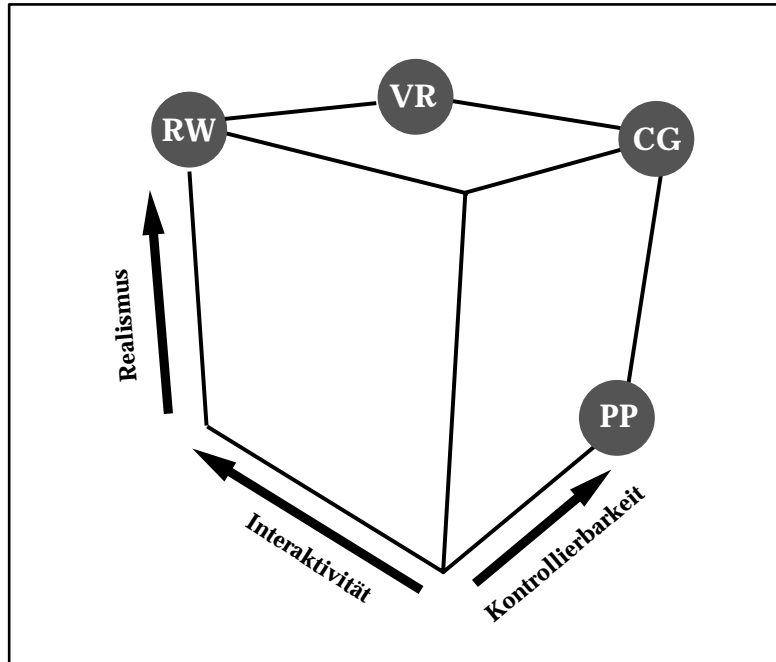


Abbildung 2.3: Virtual Reality Cube (VR-cube) nach Bülthoff et al., (1997).

Anhand des VR-cube kann man verschiedene experimentelle Ansätze zur Erforschung der Leistung der menschlichen Informationsverarbeitung vergleichen. Dafür trägt man sie entlang der drei Dimensionen des Würfels - Kontrollierbarkeit, Interaktivität und Realismus - auf.

Die klassische **Psychophysik (PP)** untersucht die Beziehungen zwischen physikalischen Reizen und den durch sie hervorgerufenen Wahrnehmungen (Erlebnissen) (Fechner, 1860). Sie bedient sich dabei der systematischen Methodik der Physik, mißt also physikalische Quantitäten wie z.B. Wahrnehmungsschwellen und Reaktionszeiten. Die verwendeten Reize sind jedoch typischerweise sehr reduziert und eignen sich deshalb nicht, menschliche Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen in komplexen Umwelten zu untersuchen. Die klassische Psychophysik ist im Koordinatensystem des VR Cube bei hoher Kontrollierbarkeit anzusiedeln, mit gleichzeitig geringem Maß an Realismus und Interaktivität. Die **Computergraphik (CG)** bietet komplexere Stimuli bei einem gleichzeitig hohen Grad an Kontrollierbarkeit. Was jedoch im Sinne des Handlungs-Wahrnehmungs Kreislaufes (s. Abb. 2.4) noch fehlt ist die Möglichkeit zur Interaktion mit der Umwelt, die gerade für komplexere kognitive Prozesse wie der Navigation wichtig ist. Die **Virtuelle Realität (VR)** vereinigt diese Forderung nach Interaktivität mit der Kontrollierbarkeit der Psychophysik und dem Realismus der Computergraphik. Zahlreiche Möglichkeiten zur Interaktivität bieten sich natürlich auch bei Experimenten in der **realen Welt (RW)**, nur ist hier die Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit nicht immer gewährleistet.

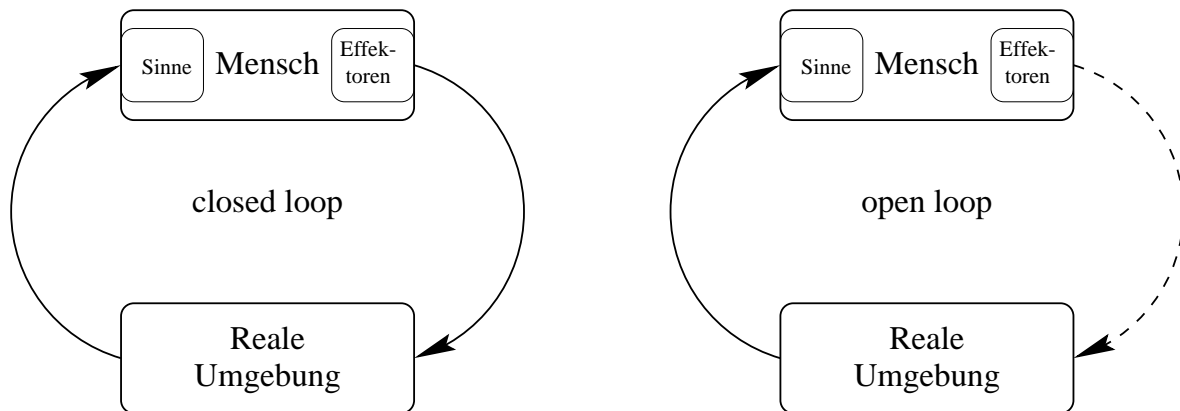


Abbildung 2.4: Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf.

Links der geschlossene Informationskreislauf in einer realen Umgebung (closed loop). Rechts in einer Umgebung mit eingeschränkter Interaktion (open loop), z.B. einer Filmvorführung.

Sonnenstand, Wetter, Bauarbeiten, abgestellte Autos etc., andererseits nur schwer kontrollierbare personenspezifische Parameter wie das Vorwissen über eine reale Umgebung.

Wegen dieser Probleme wurden in der Raumkognitionsforschung schon früh in Laborexperimenten simulierte oder reproduzierte Umgebungen verwendet, insbesondere Dia- und Filmsequenzen sowie Modelle der räumlichen Umgebung (Goldin & Thorndyke, 1982). All diesen Versuchen war jedoch gemein, daß sie entweder unrealistisch waren (Modelle) oder aber nicht interaktiv (Filmsequenzen), also eine wesentliche Komponente natürlicher Navigation fehlte (Flach, 1990).

Durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Graphikrechner und Ein- und Ausgabegeräten innerhalb der letzten Jahre bietet sich nun die Aussicht, dies oben angeführten Mängel an Interaktivität, Realismus, Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit durch die Verwendung virtueller Versuchsumgebungen zu überwinden. Bisher ist die Anzahl grundlagenorientierter Untersuchungen menschlicher Raumkognition unter Verwendung virtueller Umgebungen noch recht gering, was sich jedoch durch die rapide Entwicklung der VR-Technologie schon bald ändern dürfte. Für einen Überblick über diese Thematik, siehe Darken, Allard, & Achille (1998), Péruch & Gaunet (1998).

2.4.3 Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf

Um die Interaktion zwischen dem Menschen und seiner Umwelt zu analysieren, bedient man sich häufig des aus der Kybernetik stammenden Regelkreises von Wahrnehmung und Handlung⁷ (s. Abb. 2.4).

Die Sinne stellen dem Menschen Informationen über seine Umwelt bereit. Über sein Verhalten steht dieser mit seiner Umwelt in Verbindung und kann dadurch die Umwelt selbst verändern bzw. seine

⁷Der Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf wird gelegentlich auch als Aktions-Perzeptions Kreislauf oder action-perception loop bezeichnet.

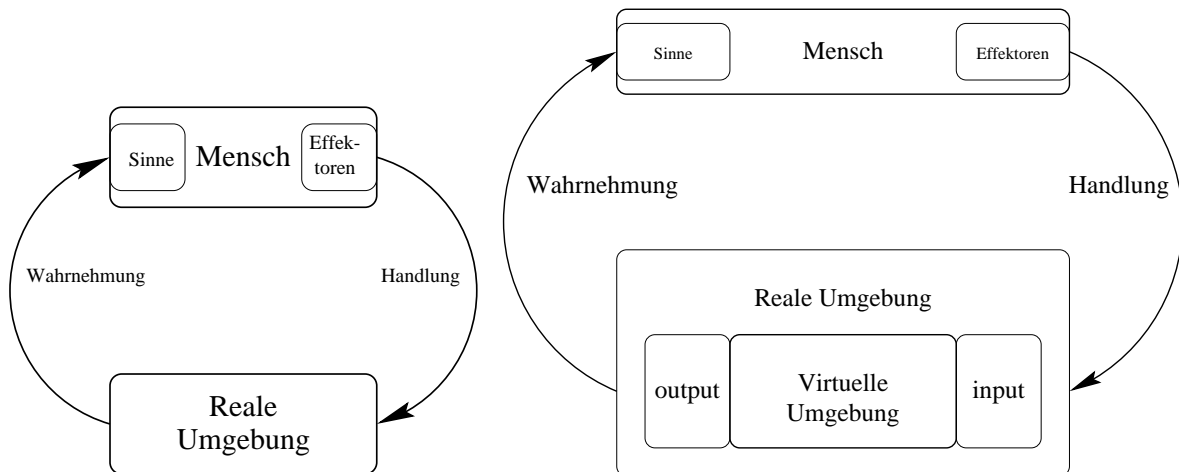


Abbildung 2.5: Handlungs-Wahrnehmungs Kreislauf in realen und virtuellen Umgebungen. VR schneidet den Kreislauf von Wahrnehmung und Verhalten auf und setzt ihn in kontrollierter Weise wieder zusammen. Die dafür verwendeten Ein- und Ausgabegeräte der VU sind mit “input” und “output” bezeichnet.

Wahrnehmung von ihr (z.B. indem er einen anderen Standpunkt einnimmt). Die Aufgabe der Wahrnehmung ist es dabei, den gesamten Kreislauf optimal zu unterstützen, um dadurch situationsgerechtes Verhalten zu ermöglichen (Bülthoff et al., 1997).

Während in der realen Umgebung der Informationskreislauf von Wahrnehmung und Handlung in einem geschlossenen Regelkreis stattfindet (closed loop, s. Abb. 2.4 links), werden viele klassische Experimente unter dem “open loop” Paradigma gemacht, bei dem die Versuchsperson keine oder nur sehr eingeschränkte Interaktionsmöglichkeiten mit ihrer Umwelt besitzt (open loop, s. Abb. 2.4 rechts). Typische Beispiele hierfür sind Film- oder Diavorführungen und allgemein passive Wahrnehmung. Siehe z.B. Goldin & Thorndyke (1982) für einen Vergleich zwischen einer realen Busfahrt und einer Filmvorführung derselben Fahrt.

In VR-Umgebungen befindet sich der Mensch i.a. in einem geschlossenen Regelkreis mit der virtuellen Umwelt, die wiederum in die natürliche Umgebung eingebettet ist (s. Abb. 2.5, rechts). Der Mensch befindet sich zwar physikalisch in der realen Umgebung, interagiert jedoch (über reale Ein- und Ausgabegeräte) mit der virtuellen Umgebung. Durch dieses Einfügen einer Schnittstelle zwischen Mensch und (virtueller) Umwelt ist einerseits vollständige Kenntnis über die Interaktion des Menschen mit der virtuellen Umgebung möglich, andererseits läßt sich der dem Menschen präsentierte Stimulus genau kontrollieren und reproduzieren.

2.4.4 Verhältnis zwischen realer und virtueller Umgebung

Will man Navigation in realen und virtuellen Umgebungen miteinander vergleichen, so stellen sich zwei grundlegende Fragenkomplexe:

1. Inwieweit läßt sich Raumwissen, das in virtuellen Umgebungen erworben wurde, auf reale Umgebungen übertragen und umgekehrt?
2. Inwieweit ähneln sich räumliches Verhalten und Raumkognition in realen und virtuellen Umgebungen? Und inwiefern läßt sich Wissen über räumliches Verhalten und Raumkognition zwischen realen und virtuellen Umgebungen transferieren?

Der erste Fragenkomplex stellt quasi die Legitimationsfrage für jegliche Art von Training in VU, das das Ziel hat, daß so entwickelte Raumwissen auf die reale Umgebung zu übertragen. Daß ein Transfer von Raumwissen zwischen realen und virtuellen Umgebungen stattfindet gilt als gesichert, auch wenn eine starke Abhängigkeit von den Simulationsparametern und der Erfahrung mit VU zu beobachten ist (Wilson, Foreman, & Tlauka, 1997; Witmer, Bailey, Knerr, & Parsons, 1996; Waller, Hunt, & Knapp, 1998). Auftretende Schwierigkeiten im Aufbau von Raumwissen lassen sich meist auf fehlende oder unzureichende Information über Ganzkörperbewegungen rückführen (Ruddle, Payne, & Jones, 1998; Presson & Montello, 1994; Peterson, Wells, Furness III, & Hunt, 1998), die beim Orientieren und Erwerb von Raumwissen eine wichtige Rolle spielen, sowohl bei Tieren (Gallistel, 1990) als auch beim Menschen (Chance, Gaunet, Beall, & Loomis, 1998). Ein weiterer Einflußfaktor scheint das visuelle Gesichtsfeld zu sein (Psozka & Lewis, 1995; Neale, 1996).

Der zweite Fragenkomplex ist schwieriger zu beantworten und noch wenig untersucht. Billinghurst & Weghorst (1995) untersuchten die Raumkognition in VU, indem sie die Versuchspersonen Skizzen der Umgebung zeichnen ließen. Die Analyse von Skizzen erwies sich als viable Methode zur Untersuchung kognitiver Karten in VU. Daniel & Denis (1993) untersuchten kognitive Prozesse, indem sie Wegbeschreibungen und deren Zustandekommen analysierten. Durch die spezifische Art und Weise, in der auf Landmarken Bezug genommen wurde, ließen sich Rückschlüsse über die zugrundeliegende mentale Repräsentation ziehen. Es kann gehofft werden, daß sich durch das bessere Verständnis von Wegbeschreibungen und der zugrundeliegenden kognitiven Prozesse bessere Navigationssysteme für reale und virtuelle Umgebungen entwickeln lassen. Einen guten Überblick über die Untersuchung der menschlichen Raumkognition in VU und dem Verhältnis zwischen realen und virtuellen Umgebungen findet sich in Péruch & Gaunet (1998).

Die Beantwortung des zweiten Fragenkomplexes ist von großer Wichtigkeit, da sich virtuelle Umgebungen gut zur Untersuchung der menschlichen Raumkognition eignen; VU haben den methodologischen Vorteil größerer Freiheit in der Gestaltung von Raumstrukturen und -inhalten und der Möglichkeit gezielter Eingriffe in den Wahrnehmung-Handlungs Kreislauf. Dadurch kann präzise kontrolliert werden, welche Rauminformation dem Menschen zur Verfügung steht und wie nützlich sie bei der Raumkognition ist. Weiter läßt sich der Einfluß einzelner Sinnesmodalitäten unabhängig voneinander untersuchen.

Bisherige Untersuchungen in VU beschränken sich meist auf die visuelle Simulation, wohingegen die Raumkognition in realen Umgebungen auf multisensorischer exterozeptiver Information (visuell, auditiv, taktil), aber auch bewegungsbegleitender sensomotorischer Information beruht (propriozeptive

und vestibuläre Reize). Wie sich diese Einschränkung auf wenige Sinnesmodalitäten auf das menschliche Orientierungsvermögen auswirkt, ist bisher nur wenig erforscht und wird oft als Nachteil der Verwendung virtueller Umgebungen angesehen. Zugleich bieten VU aber die einzigartige Möglichkeit, die Sinnesreize und deren Einfluß auf die Raumkognition voneinander abzugrenzen und isoliert zu erforschen.

So verwendeten Gillner & Mallot (1998) eine ausschließlich visuell dargebotene VU, um Navigation unter Ausschluß vestibulärer und propriozeptiver Reize zu untersuchen. Die Ergebnisse unterstützen das von Schölkopf & Mallot (1995) entwickelte Modell einer Raumrepräsentation anhand von **Ansichtgraphen** (“**view-graphs**”). In dieser Ansichtgraphen-basierten Repräsentation werden lokale Ansichten (Knoten) durch Bewegungsentscheidungen (Verbindungslinien zwischen benachbarten Knoten) miteinander verknüpft.

Untersuchungen von May, Péruch, & Savoyant (1995) und Chance et al. (1998) ergaben, daß vestibuläre und propriozeptive Reize für die Wahrnehmung von Rotationen eine wichtigere Rolle spielen als für die Translationen. Ausschließlich visuell simulierte Drehungen ergaben ein deutlich vermindertes Orientierungsvermögen gegenüber Rotationen mit zusätzlicher vestibulärer Information. Zudem war die Tendenz zu Simulatorkrankheiten für simulierte Drehungen höher als für reale Drehungen. Am niedrigsten war die Neigung zu Simulatorkrankheiten für reale Rotationen als auch Translationen (Chance et al., 1998).

Für landmarkenbasierte Orientierungsexperimente in einer realen Stadt (Tübingen) und dessen Nachbau in VR ließen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen realen und simulierten Rotationen feststellen (Sellen, 1998). Hierbei wurde ein gekrümmte Projektionsleinwand mit einem horizontales Gesichtsfeld von 180° (verglichen mit 44° in Chance et al. (1998)) und eine hohe Auflösung der visuellen Simulation verwendet, wodurch ein hoher Grad an visuellem Realismus erreicht wurde. Ob ein größeres horizontales Gesichtsfeld ausschlaggebend ist für besseres Orientierungsvermögen ist noch weitgehend ungeklärt. Um dieser Frage nachzugehen reduzierten wir in einem unserer Experimente das horizontale Gesichtsfeld schrittweise um jeweils die Hälfte, von 180° bis auf 11.25° . Henry (1992) führte Navigationsexperimente in einem virtuellen Museum und dem entsprechenden realen Museum durch. Dabei zeigten sich in der VU Defizite im Aufbau von quantitativem Raumwissen; Versuchspersonen unterschätzten Distanzen und waren weniger genau in Orientierungsaufgaben. Es konnte kein signifikanter Leistungsunterschied zwischen den drei verschiedenen verwendeten Displays (Monitor, HMD mit und ohne Positionstracking) beobachtet werden. Die VU vermittelte jedoch ein überzeugendes Gefühl von “Präsenz” (“sense of being there”, nach Hendrix & Barfield (1996)) und Immersion. Für einen Überblick über Präsenz in VU siehe Sheridan (1992), Schloerb (1995) und Hendrix & Barfield (1996).

In einer Reihe von Experimenten untersuchten Ruddle, Payne, & Jones (1997) das Erlernen von Raumwissen durch Navigation in einem komplexen virtuellen Gebäude. Nach anfänglicher Desorientierung ergaben sich ähnliche Navigationsfähigkeiten (quantifiziert durch Schätzungen von Richtung und relativer Orientierung) wie bei einem vergleichbaren Experiment in einem realen Gebäude

(Thorndyke & Hayes-Roth, 1982). Im realen wie im virtuellen Gebäude verbesserten sich die Distanz- und Richtungsschätzungen für das Lernen anhand einer Karte anstatt durch explorative Navigation.

Ivanenko, Viaud-Delmon, Siegler, Israël, & Berthoz (1998) untersuchten das Zusammenwirken visueller und vestibulärer Reize bei Rotationen um die eigene Körperachse, indem sie Versuchspersonen inkonsistente visuelle und vestibuläre Informationen darbotei⁸: Zu einer passiven Ganzkörperrotation um 180° um die vertikale Achse wurde über einen Datenhelm eine Rotation eines virtuellen quadratischen Raumes um nur 90° dargeboten. Diese Prozedur wurde 45 Minuten lang wiederholt. Nur eine der 25 Versuchspersonen bemerkte die Inkonsistenz der visuellen und vestibulären Reize. Nach der Adaptationsphase verringerte sich die Wahrnehmung von Ganzkörperrotationen um 24%, was eine hohe Plastizität der Drehwahrnehmung impliziert. Inkohärente visuelle und vestibuläre Simulation (VVS) ist somit ausreichend, um die vestibuläre Wahrnehmung von Rotationen zu rekalisieren.

Siehe Péruch & Gaunet (1998) für eine weiterreichende Diskussion der wichtigsten Forschungsergebnisse zum Vergleich virtueller und realer Umgebungen.

2.4.5 Orientierung in simulierten Umgebungen

Generell zeigt sich, daß die zur Orientierung nötigen Rauminformationen in VU stark von der Aufgabenstellung und dem Interface zwischen Mensch und Maschine abhängen. Verschiedene Ansätze sind denkbar, um das Orientierungsvermögen in VU zu verbessern. Einerseits kann versucht werden, fehlende vestibuläre und propriozeptive Reize durch kompensatorische Informationen auszugleichen. Diesen Ansatz verfolgten Witmer et al. (1996), indem sie zur besseren Distanzwahrnehmung alle drei Meter zurückgelegte Strecke ein akustisches Kontrollsignal (Piepton) einspielten. Dadurch verbesserten sich die Distanzschätzungen wesentlich, interessanterweise auch für die Versuche, in denen keine kompensatorische Information mehr vorhanden war. Darken & Sibert (1996) verwendeten eine andere Herangehensweise, indem sie die simulierte Welt durch zusätzliche metrische Information aufwerteten. Ein der VU überlagertes Linienraster verbesserte das Orientierungsvermögen, gemessen durch Zeigeexperimente, wohingegen eine überlagerte Landkarte das Navigationsvermögen verbesserte.

Eine andere Herangehensweise besteht darin, das Interface zwischen Mensch und Maschine möglichst intuitiv und bedienungsfreundlich zu gestalten und damit die Schnittstelle möglichst genau den menschlichen Bedürfnissen anzupassen. Diesen Ansatz verfolgten wir in der vorliegenden Studie, indem wir als eine der beiden Fortbewegungsmetaphern ein modifiziertes Trainings-Liegefahrrad verwendeten (s. Kap. 4.1.2), welches eine intuitivere Lokomotion ermöglichen sollte als etwa ein Maus-Interface. Es ist jedoch umstritten, ob "möglichst realistische" Mensch-Maschine Schnittstellen auch stets zu besseren Ergebnissen führen. Es ist zu vermuten, daß es wichtiger ist, die Schnittstelle den spezifischen menschlichen Bedürfnissen anzupassen als nur den Realismus der Simulation zu erhöhen.

⁸sogenannte Visuell-Vestibuläre Stimulation (VVS)

Eine Studie von Witmer et al. (1996) ergab zum Beispiel, daß die Verwendung eines Laufbandes anstatt eines Joystick keine verbesserten Distanzschätzung ermöglichte, obwohl sie eindeutig den Grad an Realismus erhöhte.

Das räumliche Orientierungsvermögen des Menschen ist beim Navigieren stark auf visuelle Reize und Ganzkörperinformation angewiesen. Um den Einfluß der visuellen und propriozeptiven Informationsquellen unabhängig voneinander zu untersuchen kann man versuchen, sie voneinander zu isolieren, also den Einfluß der einen oder anderen Informationsquelle auszuschließen oder zumindest einzuschränken.

Sauvé (1989), Klatzky et al. (1990) und Loomis et al. (1993) schlossen visuelle Informationquellen aus, indem sie Heimfindeexperimente mit blinden Versuchspersonen und Normalsichtigen mit verbundenen Augen durchführten. Umgekehrt läßt sich der Einfluß propriozeptiver und vestibulärer Reize in natürlichen Umgebungen nicht einfach ausschließen. Eine Methode, die deshalb in der Raumkognitionforschung häufig verwendet wurde, ist die Präsentation von Dia- oder Filmsequenzen.

Goldin & Thorndyke (1982) untersuchten die Landmarkenerkennung nach einem Training anhand einer Videosequenz und verglichen sie mit einer realen Fahrt durch dieselbe Umgebung. Die Videosequenz führte tendenziell zu höheren Landmarkenerkennungsraten, jedoch zu schlechteren Ergebnissen für das Zeigen in Richtung ungesehener Landmarken. Gale, Golledge, Pellegrino, & Doherty (1990) verglichen einen realen Fußmarsch durch eine Vorstadtgegend mit einer entsprechenden Videosequenz und fanden keinen Unterschied in der Fähigkeit, Landmarken wiederzuerkennen. In den Navigationsleistungen im Anschluß an das Training gab es jedoch signifikante Unterschiede: Erst nach fünf Wiederholungen der Videosequenz wurde der Trainingseffekt eines einmaligen realen Fußmarsches erreicht.

Die Benutzung von Videosequenzen erlaubt es, propriozeptive Reize auszuschließen. Durch die Passivität des Betrachters geht jedoch ein wichtiger Bestandteil natürlicher Navigation verloren. Dadurch kann diese Untersuchungsmethode nicht zwischen dem Einfluß fehlender Interaktivität und dem Einfluß fehlender propriozeptiver Reize unterscheiden. Einen Ausweg liefert hier die Verwendung virtueller Umgebungen, die eine kontrollierbare Interaktivität gestatten und gleichzeitig die Möglichkeit bieten, propriozeptive Information je nach Bedarf zur Verfügung zu stellen oder nicht. Die aktiv explorierende Rolle, die dem Beobachter in VU zukommt, ist ein wichtiger Faktor für die Erforschung räumlicher Orientierungsprozesse (Flach, 1990).

Untersuchungen von Péruch, Vercher, & Gauthier (1995) ergaben, daß die Interaktivität für die Navigationsfähigkeit in VU eine wesentliche Rolle spielt: Der kürzeste Weg konnten nach aktiver Exploration der VU besser gefunden werden als nach passiver.

2.4.6 Dreiecksvervollständigung in virtuellen Umgebungen

Péruch et al. (1997) führten ein zu den Untersuchungen von Loomis et al. (1993) ähnliches Experiment zur Dreiecksvervollständigung in einer virtuellen Umgebung durch. Da unsere Untersuchungen

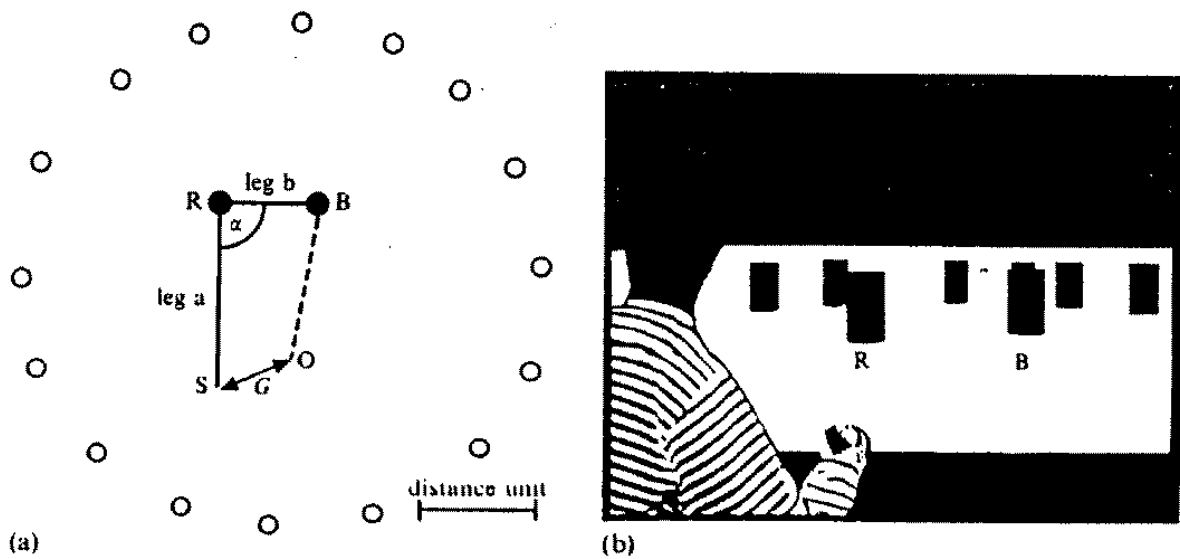


Abbildung 2.6: Virtuelle Versuchsumgebung in den Experimenten von Péruch et al. (1997)

Links: Übersichtsskizze der Umgebung. In der Mitte der 16 weißen Zylinder befindet sich ein zu navigierendes Dreieck, mit Ausgangspunkt S, erstem Zielpunkt R (roter Zylinder) und zweitem Zielpunkt B (blauer Zylinder). Der absolute Fehler G ist zwischen dem beobachteten Endpunkt O und dem korrekten Endpunkt S eingezeichnet.

Rechts: Beispiel einer Ansicht der Szenerie, in der sich der Beobachter am Ausgangspunkt befindet und direkt vor sich den roten und blauen Zylinder sieht (R bzw. B). Graphik aus Péruch, May, & Wartenberg (1997)

einen engen Bezug zu denen von Péruch et al. (1997) haben, wollen wir hier im Detail auf diese eingehen, um sie in Kapitel 6.1 mit unseren Ergebnissen vergleichen zu können.

Die VU in den Experimenten von Péruch et al. (1997) bot (abgesehen von den rudimentären propriozeptiven Informationen durch den Joystick zur Fortbewegung in der VU) nur visuelle Informationen. Die VU bestand aus 16 gleichmäßig in einem Kreis von 60 m Durchmesser aufgestellten Zylindern von 2 m Höhe (s. Abb. 2.6). Das zu navigierende Dreieck befand sich in randomisierter Orientierung und Position inmitten dieses Kreises und wurde durch den (nicht markierten) Ausgangspunkt, einen roten Zylinder und einen blauen Zylinder definiert. Um den Einfluß isolierter visueller Information mit den Ergebnissen zur nichtvisuellen Dreiecksvervollständigung von Loomis et al. (1993) vergleichen zu können, wurden eine Untermenge von deren Dreiecksgeometrien verwendet.

Das visuelle Display bestand aus einer planaren Videoprojektionsleinwand, die für den Beobachter ein physikalisches visuelles Feld (FOV⁹) von 45° vertikal mal 37° horizontal aufspannte. Neben der Dreiecksgeometrie wurde als weitere Kontrollvariable das simulierte Gesichtsfeld (FOVs) variiert, bei konstant gehaltenem physikalischem Gesichtsfeld (FOV).

Durch die Variation der Dreiecksgeometrie wurden die Kodierungsfunktionen für rein visuell wahrgenommene Distanzen und Richtungen untersucht, um sie anschließend mit den Ergebnissen von Loomis et al. (1993) zur nichtvisuellen Navigation zu vergleichen.

In der visuellen als auch nichtvisuellen Dreiecksvervollständigung zeigte sich eine in Richtung des Mittelwertes verschobene Winkelantwort, also eine Kompression¹⁰ der Drehwinkel. Nichtvisuelle Dreiecksvervollständigung ergab eine Tendenz zum (korrekten) mittleren Drehwinkel von 90°, visuelle Navigation ergab eine Tendenz zu einem zu geringen (inkorrekten) mittleren Drehwinkel. Die Anwendung des Kodierfehlermodells von Fujita et al. (1993) ergab, daß die Drehwinkel von 60°, 90° und 120° unter visuellen Bedingungen als 113°, 120° und 132° mental kodiert wurden, unter nichtvisuellen Bedingungen (Loomis et al., 1993) als 75°, 89° und 102°. Im Mittel waren also die Drehwinkel unter nichtvisuellen Bedingungen korrekt, wenn auch in Richtung des Mittelwertes verschoben. Unter visuellen Bedingungen drehten die Versuchspersonen jedoch generell nicht weit genug. Ein Kontrollexperiment von Péruch et al. (1997) bestätigte dies: Versuchspersonen waren in derselben VU nicht in der Lage, sich korrekt um 180° zu drehen. Statt 180° wurde ein mittlerer Drehwinkel von $150.4^\circ \pm 0.9^\circ$ beobachtet, also eine Unterschätzung der Eigenrotation um 30°. Untersuchungen von Klatzky et al. (1990) ergaben hingegen, daß nichtvisuelle Ganzkörperdrehungen korrekt ausgeführt werden konnten.

⁹Das physikalische visuelle Feld (FOV, field of view, gelegentlich auch absolutes FOV genannt) ist eine Eigenschaft des physikalischen Aufbaus; es ist definiert als der Winkel (horizontal bzw. vertikal), unter dem der Beobachter das Display wahrnimmt.

Das vom Computer generierte (simulierte) Gesichtsfeld (FOVs, gelegentlich auch geometrisches FOV) hingegen ist eine Eigenschaft der Simulation. Es ist definiert über die Geometrie der Sichtpyramide (viewing frustrum), stellt also den Winkel (horizontal bzw. vertikal) dar, unter dem der virtuelle Augpunkt die simulierte Umgebung wahrnimmt.

Für $FOV > FOVs$ tritt bildlich gesprochen ein fernrohrartiger Effekt auf, für $FOV < FOVs$ ein Weitwinkeleffekt.

¹⁰s. S. 65 für eine Definition von "Kompression" im Zusammenhang mit Verhaltensantworten.

Es zeigte sich ein systematischer Einfluß der Dreiecksgeometrie auf die Heimfindeleistungen: Der beobachtete Fehler im Heimfindeverhalten vergrößerte sich für eine Verlängerung des zweiten Dreiecksschenkels und für eine Verringerung des Drehwinkels zwischen dem zweiten und dritten Dreiecksschenkel.

Einfluß des Gesichtsfeldes

Es ist allgemein akzeptiert, daß eine Vergrößerung des physikalischen Sichtfeldes zu einem realistischeren räumlichen Situationsempfinden und zu einer verbesserten Bewegungswahrnehmung führt (Hendrix & Barfield, 1996). Andererseits bieten die meisten derzeitigen Displays ein recht geringes horizontales FOV (meist unter 100°), verglichen mit dem natürlichen menschlichen Gesichtsfeld ($\approx 180^\circ$, s. Burdea & Coiffet (1994, Kap. 2.5.1)).

Um den Einfluß der simultan dargebotenen Information losgelöst vom Einfluß des peripheren Sehens zu untersuchen variierten Péruch et al. (1997) das FOVs, ohne das FOV anzupassen. Es konnte dabei keine signifikanter Effekt des simulierten Gesichtsfeldes nachgewiesen werden. Durch eine Vergrößerung des FOVs stieg zwar die simultan dargebotene Informationsmenge, es kann jedoch gefragt werden, ob in der verwendeten rudimentären VU damit auch zusätzliche *nützliche* Information sichtbar wurde. Es ist zu vermuten, daß sich die zusätzlich dargebotene "Information" auch aus der Geometrie der kreisförmig aufgestellten Zylinder abgeleitet ließ. Das Fehlen eines signifikanten FOVs-Effektes interpretierten Péruch et al. (1997) dahingehend, daß für den Erwerb von Raumwissen nicht die simultan dargebotene Information (die mit dem FOVs korreliert) der ausschlaggebende Faktor sei, oder zumindest weniger relevant als der Einfluß des peripheren Sehens.

Da das physikalische visuelle Feld (FOV) nicht mit dem simulierten (FOVs) identisch war, ergab sich eine räumliche Verzerrung, i.e. ein Weitwinkel- bzw. Fernrohreffekt, dessen Einfluß auf die Raumkognition noch wenig untersucht ist (Slater & Usoh, 1993). In den Ergebnissen von Péruch et al. (1997) ist somit der Einfluß simultan sichtbarer Rauminformation mit dem ungewissen Einfluß besagter räumlichen Verzerrung konfundiert. Um den Einfluß des visuellen Feldes unter natürlicheren Bedingungen zu untersuchen, i.e., ohne perspektivische Verzerrung, variierten wir in unserem vierten Experiment das physikalische und simulierte visuelle Feld gemeinsam (i.e., $FOV = FOVs$). Wir vermuteten, daß die Einschränkung des FOV eine Verschlechterung der Homingleistungen und eine Vergrößerung der Variabilität der Verhaltensantworten bewirken würde.

In realen Versuchsumgebungen hatten Alfano & Michel (1990) einen deutlichen Einfluß des visuellen Feldes (FOV) auf die Integration räumlicher Information gefunden, vermutlich als Funktion der gleichzeitig wahrnehmbaren Rauminformation. Sie ließen Versuchspersonen einen unbekanntem Raum erkunden, während sie eine Brille trugen, die das Gesichtsfeld auf 9° , 14° , 22° oder 60° einschränkte. Jede Einschränkung des peripheren Gesichtsfeldes resultierte in einer Verschlechterung der Wahrnehmung und Leistung (quantifiziert durch benötigte Zeit und Fehleranzahl). Zudem traten bei 9° und 14° Unwohlsein, Schwindel, Unsicherheit und Desorientierung auf, Symptome, die aus

VR-Experimenten als “Simulatorkrankheit” (“simulator sickness”) bekannt sind (Kennedy, Lanham, Drexler, Massey, & Lilienthal, 1997). Beschränkung des FOV reduziert jedoch auch die Beteiligung des peripheren Sehens und könnte darüber den Erwerb von Raumwissen beeinflussen (Johansson & Borjesson, 1989).

2.5 Zusammenfassung des Literaturüberblicks und Motivation der hier vorliegenden Untersuchungen

In der Literatur sind nur wenige Beispiele für die Untersuchung des menschlichen Heimfindeverhaltens unter genauer Kontrolle der dargebotenen Reize zu finden. Für unsere Forschungsinteressen relevante Studien sind einerseits die Experimente zur nichtvisuellen Dreiecksvervollständigung von Sauvé (1989), Klatzky et al. (1990) und Loomis et al. (1993). Diese ergaben u.a., daß homing allein aufgrund propriozeptiver und vestibulärer Reize möglich ist, dabei jedoch als systematischer Fehler eine Kompression im Antwortverhalten festzustellen ist.

Zur Untersuchung visueller Dreiecksvervollständigung in virtuellen Umgebungen existieren nach unserem Wissensstand lediglich die Untersuchungen von Péruch et al. (1997), über die auch in Wartenberg, May, & Péruch (1998) berichtet wird. Darin wurde ebenfalls eine Kompression des Antwortverhaltens festgestellt. Während die rein propriozeptiven Bedingungen zu im Mittel korrekten Verhaltensantworten führten, zeigte sich für die rein visuelle Navigation eine generelle Überschätzungen der Winkelantworten, d.h. die Versuchspersonen drehten generell weniger weit als intendiert. Péruch et al. (1997) schlußfolgerten aus ihren Ergebnissen, daß visuelle Information für die Verarbeitung räumlicher Information die beherrschende Rolle spielt, jedoch nicht allein die fehlenden propriozeptiven und vestibulären Reize kompensieren kann.

Das Fehlen eines signifikanten FOVs-Effektes interpretierten Péruch et al. (1997) dahingehend, daß für den Erwerb von Raumwissen nicht die simultan dargebotene Information (die mit dem FOVs korreliert) der ausschlaggebende Faktor ist, sondern eher das periphere Sehen (vgl. Alfano & Michel (1990)).

Szenenwechsel als Paradigma zur Untersuchung der Pfadintegration

Hauptthema unserer Untersuchungen war die Differenzierung zwischen zwei komplementären Informationsquellen zur Navigation: Positionsbasierte Navigation (Piloting) einerseits und geschwindigkeits- und beschleunigungsbasierte Navigation (Pfadintegration) andererseits.

In den Experimenten von Péruch et al. (1997) konnten die Versuchspersonen sowohl Piloting als auch Pfadintegration anwenden, um zum Ausgangspunkt zurückzufinden. Piloting könnten in dem Fall heißen, daß die Versuchspersonen beim homing “**scene matching**” anwenden, also die momentanen Ansicht mit der gespeicherten Ansicht, wie sie sie von Ausgangspunkt aus sahen, vergleichen.

Pfadintegration hieße, unabhängig von Landmarken und allein aufgrund des optischen Flusses die momentane Position und Orientierung aufzuintegrieren.

Um zwischen Piloting und Pfadintegration differenzieren zu können, verwendeten wir ein Paradigma, welches Ähnlichkeit zu den Untersuchungsmethoden von Müller & Wehner (1988) aufweist (s. S. 19). Während Müller & Wehner (1988) Wüstenameisen vor ihrem Rückweg in einer andere Umgebung versetzten, vertauschten wir die Szenerien, wir ließen also die Versuchspersonen in einer *anderen* Umgebung den Rückweg zum Ausgangspunkt antreten. Dadurch war ausgeschlossen, daß die Versuchspersonen den Ausgangspunkt per scene matching wiedererkennen würden. Jedes Experiment fand also in zwei verschiedenen (wenn auch ähnlichen) virtuellen Umgebungen statt, eine für den Hinweg ("Exkursion"), die andere für den Rückweg. Aus dem Versuchsparadigma ergibt sich auch die Notwendigkeit der Verwendung virtueller Umgebungen da sich nur diese "austauschen" lassen, was subjektiv einer "Teleportation" á la Startrek gleicht.

Durch den Szenenwechsel konnten die Versuchspersonen *innerhalb* einer Umgebung prinzipiell sowohl Piloting also auch Pfadintegration verwenden. Um den Ausgangspunkt wiederzufinden war Piloting als Navigationsmechanismus jedoch ausgeschlossen.

Um die Homingaufgabe lösen zu können, mußten die Versuchspersonen während des Szenenwechsels (der in einer kurzen Dunkelphase stattfand) eine mentale Raumrepräsentation speichern. Diese könnte, ähnlich wie bei Tiere vermutet, ein einfacher Heimvektor sein, oder aber eine komplexere kognitive Karte, z.B. eine bildhafte Vorstellung der Dreiecksgeometrie.

Durch den Szenenwechsel sind die Versuchspersonen in ihrem natürlichen Navigationsverhalten eingeschränkt, und wir erwarteten dementsprechend einer reduzierte Homingleistung gegenüber Navigation ohne Szenenwechsel (s. Experiment 2, Kap. 5.2).

Einfluß der Szenerie

Péruch et al. (1997) führten ihre Versuche in einer eher kargen VU durch, die einen einfachen geometrischen Aufbau hatte - Das zu navigierende Dreieck war von 16 Zylindern umgeben, ansonsten war die Umgebung "leer". Dadurch könnten die Versuchspersonen stets wissen, wie weit sie vom "Rand" der Umgebung (repräsentiert durch die kreisförmige angeordneten Zylinder) entfernt waren. Um Richtungen abzuschätzen konnte man "Zylinder zählen", was zumindest im Zentrum des Kreises zu korrekten Drehbewegungen führen sollte (i.e., 22.5° entsprechen einem Zylinder).

Um den Einfluß der Szenerie auf das Navigationsverhalten systematisch zu untersuchen führten wir Heimfindeexperimente in drei Szenerien durch, die einen unterschiedlichen Grad an Realismus, Komplexität und Rauminformation boten. Wir vermuteten, daß die Homingleistung in einer natürlicheren Umgebung mit einer Vielzahl von Orientierungshilfen besser sei als in einer kargen, artifiziellen Umgebung.

Einfluß des Bewegungsmodells

Wie wirken sich zusätzliche propriozeptive Reize auf die Navigation in virtuellen Umgebungen aus? Um dieser Frage nachzugehen, verglichen wir ein einfaches, tastenbasiertes Bewegungsmodell mit einem Fahrradbewegungsmodell, welches ein modifiziertes Trainings-Liegefahrrad als Eingabegerät verwendete und zusätzliche propriozeptive Reize vermittelte. Wir vermuteten, daß das komplexere Fahrradbewegungsmodell intuitivere Fortbewegung und ein besseres Distanzempfinden gestattet.

Kapitel 3

Überblick über die Experimente

Die vorliegende Studie basiert auf vier Experimenten - ein Hauptexperiment und drei Nachfolgeexperimenten:

1. Ein Hauptexperiment, in dem drei verschiedene Versuchsumgebungen (Punktewolke, Stuhl-landschaft und Stadt) und zwei verschiedene Bewegungsmodelle (Maus und Fahrrad) untereinander kontrastiert wurden (s. Kap. 5.1).
2. Ein Kontrolleexperiment, in dem die Versuchspersonen in der unveränderten Stadtlandschaft zum Ausgangspunkt zurückfinden sollten, in der also im Gegensatz zum Hauptexperiment kein Szenenwechsel stattfand (s. Kap. 5.2).
3. Ein Vergleichsexperiment, in dem wir ein neu entwickeltes Fahrradbewegungsmodell mit dem alten verglichen (s. Kap. 5.3).
4. Ein weiteres Experiment, in dem wir den Einfluß des Gesichtsfeldes (FOV) in der Punktewolke untersuchten (s. Kap. 5.4).

Alle vier Experimente benützen Dreiecksvervollständigung als experimentelles Paradigma, eine etablierte Methode zur Untersuchung von grundlegenden Navigationsfähigkeiten. In jedem der Experimente sollten die Versuchsperson auf direktem Weg zum Ausgangspunkt zurückfinden, nachdem sie sich in der "Exkursion" entlang zweier Schenkel eines gleichschenkligen Dreiecks vom Ausgangspunkt entfernt hatten.

Um den Einfluß von Landmarken zu reduzieren, wurde die Versuchsperson¹ für den Rückweg in eine andere, ähnliche Versuchsumgebung versetzt², ähnlich den Experimenten von Müller & Wehner (1988), in denen Ameisen für den Rückweg in einer andere Umgebung ausgesetzt wurden. Dadurch

¹außer in Experiment 2

²Position und Orientierung waren für jeden "Teleport" randomisiert.

konnte die Versuchsperson nur ihre mentale Vorstellung von Richtung und Entfernung zum Ausgangspunkt (sog. Heimvektor) zur Lösung der Aufgabe benützen, da der Ausgangspunkt in der neuen Versuchsumgebung durch nichts ausgezeichnet war. In der realistischen Stadtumgebung führte dieses Paradigma des Versetzens in eine andere, wenngleich ähnliche Umgebung anfangs gelegentlich zu Verwirrungen der Versuchspersonen. Nach einer kurzen Gewöhnungsphase akzeptierten die Versuchspersonen jedoch alle dieses Versuchsparadigma und konnten die Aufgabe erfolgreich ausführen.

1. Hauptexperiment - Navigationsstrategien und Bewegungsmodell

Um einerseits den Einfluß von Navigationsstrategien und den hierfür verwendeten Landmarken zu untersuchen, wurden im Hauptexperiment drei verschiedene Versuchsumgebungen miteinander verglichen, die jeweils verschiedene Navigationsstrategien begünstigen oder erschweren. Eine der Fragestellungen, die uns beim Entwerfen der Szenerien leitete, war ob es (in virtuellen Umgebungen) möglich ist, allein anhand von Pfadintegration³ zum Ausgangspunkt zurückzufinden. Hierfür wurde eine virtuelle Umgebung entwickelt, die ausschließlich aus zufällig angeordneten Punkten besteht, und dadurch keine verlässlichen Orientierungspunkte anbietet, die für positionsbasierte Navigationsstrategien nötig sind. Damit verglichen wurde Navigation in einer realistischen Stadtumgebung, in der sich Piloting als Navigationsstrategie geradezu aufdrängt. Eine Zwischenstellung nimmt die Stuhllandschaft ein, die lediglich aus zufällig über eine große Rasenfläche verteilten Stühlen besteht. In ihr ist nur bedingt Piloting möglich; absolute Distanzschätzungen sollten jedoch leichter sein als in der Punktwolke, da die Stühle eine bekannten Referenzgröße darstellen. Siehe Kapitel 4.2 für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Szenerien.

Andererseits waren wir am Einfluß des Bewegungsmodells und des Eingabemediums auf das Heimfindeverhalten interessiert. Hierfür verglichen wir ein einfaches, maustastenbasiertes Bewegungsmodell mit einem komplexeren fahrradbasierten Bewegungsmodell, bei dem ein modifiziertes Trainings-Liegefahrrad als Eingabemedium diente (s. Kap. 4.1.2). Dieses bietet neben den visuellen Reizen der Simulation zusätzliche propriozeptive Reize, insbesondere Muskelfeedback und gewisse vestibuläre Reize durch die Schräglage in den Kurven. Welchen Einfluß hat die Andersartigkeit dieses Bewegungsmodells und die zusätzliche propriozeptive Information auf die Navigationsfähigkeit?

2. Kontrolleexperiment - ohne Szenenwechsel

Nur im Kontrolleexperiment wurden die Versuchspersonen nicht "teleportiert", durften also in derselben unveränderten Versuchsumgebung ihren Rückweg antreten⁴. Motivation für dieses Kontrolleexperiment war die sich ergebende Notwendigkeit für einen Vergleichmaßstab für die anderen Experimente: Wie gut kann man überhaupt in einer unveränderten virtuellen Umgebung zum Ausgangspunkt zurückfinden? Da sich die Versuchsumgebungen für den Hin- und Rückweg nur in der Stadtlandschaft

³also der ausschließlichen Verwendung geschwindigkeits- und beschleunigungsbasierter Navigationsstrategien

⁴Die kurze Dunkelphase, in der in den anderen Experimenten der Szenenwechsel stattfand, wurde beibehalten.

wesentlich unterschieden, wurde dieses Kontrollexperiment nur in der Stadtlandschaft durchgeführt. Zudem lieferten die beiden anderen Versuchsumgebungen (Punktewolke und Stuhllandschaft) gewoltermaßen nur unzureichende Orientierungspunkte, so daß wir keinen großen Unterschied zwischen Heimfindeverhalten mit und ohne “Teleportation” erwarteten.

3. Vergleichsexperiment - Fahrradmodelle

Im Vergleichsexperiment wurde das bisherige Fahrradbewegungsmodell, das - ähnlich einem realen Fahrrad - keine Drehungen auf der Stelle erlaubte, mit einem neu entwickelten Bewegungsmodell verglichen. Mit diesem konnte man sich durch Gewichtsverlagerung bzw. Lenkbewegung auf der Stelle drehen, jeweils in der Richtung, in die man sich neigte. Grund für die Entwicklung dieses neuen Bewegungsmodell war einerseits der Wunsch gewesen, das Bewegungsmodell besser mit dem der Maus vergleichen zu können, welches ja eine Drehung auf der Stelle erlaubte. Andererseits hatten einige Versuchspersonen rückgemeldet, daß sie mit dem Mausbewegungsmodell besser zurecht gekommen waren, weil es Rotation ohne gleichzeitige Translation ermöglichte.

4. Ergänzungsexperiment - Variation des Gesichtsfeldes

Im vierten und letzten Experiment dieser Serie untersuchten wir den Einfluß des FOV auf die Homingleistung. Hierfür wurde das horizontale FOV für jeden neuen experimentellen Block schrittweise halbiert, von 180° bis auf 11.25°.

Als Bewegungsmodell verwendeten wir des herkömmliche Fahrradbewegungsmodell, da es gegenüber der Maus eine größere Variabilität in der Rotations- und Translationsbewegung ermöglicht. Vorversuche ergaben, daß die Homingaufgabe mit dem Mausbewegungsmodell für kleine FOV schlicht nicht lösbar war: Die für das Mausmodell vorgegebene Rotationsgeschwindigkeit war zu hoch, um über die pro Bild dargebotene Information die Größe des Drehwinkels wahrzunehmen.

Als Versuchsumgebung wählten wir die Punktlandschaft, die eine klarere Interpretation der Ergebnisse erlaubt: So wäre in der Stadtumgebung nicht auszuschließen gewesen, daß Versuchspersonen komplexere (nicht intendierte) Navigationsstrategien verwenden, etwa aus der lokalen Ansicht und ihrem Vorwissen über die Geometrie der Plätze das Layout der gesamten Umgebung und ihrer Position rekonstruieren.

Durch die Variation des FOV wurde einerseits der Einfluß des peripheren Sehens bzw. des optischen Flusses untersucht, andererseits der Einfluß der simultan dargebotenen Information: Für ein kleines FOV ist die zu einem Zeitpunkt dargebotenen Information wesentlich geringer als die im Laufe der Fortbewegung insgesamt dargebotene Information. Es stellt sich die Frage, wie der Beobachter diese zeitlich gestaffelt dargebotene Rauminformation (insbesondere während einer Drehung) aufintegrieren bzw. kombinieren kann, um eine kohärente Raumrepräsentation zu erlangen.

Kapitel 4

Methoden

Im Sinne des Wahrnehmungs-Handlungs Kreislaufes (vgl. Kap. 2.4.3) wollen wir in Kapitel 4.1 die Mensch-Maschine Schnittstelle beschreiben, d.h. die Ausgabe- und Eingabeeinheiten, mit denen der Mensch mit der virtuellen Umgebung interagieren kann. In Kapitel 4.2 werden wir auf die verschiedenen virtuellen Umgebungen selbst eingehen.

4.1 Interaktion - Versuchsumgebung und Simulationsanlage

Kernstück der Simulationsanlage ist ein Silicon Graphics Onyx2 Infinite-Reality Grafikrechner mit 3 Grafik-Pipelines, 10 Prozessoren und 2.5 GB Hauptspeicher. Auf diesem Rechner erfolgen alle Berechnungen zur Generierung des zweidimensionalen Abbildes der dreidimensionalen virtuellen Umgebung, sowie die Kommunikation mit den peripheren Ein- und Ausgabeeinheiten. Der Graphikrechner zeichnet sich dadurch aus, daß grundlegende Graphikalgorithmen bereits in Hardware implementiert sind, unter anderem photorealistische Oberflächengestaltung (hardware texture mapping), Z-Buffer und Reduzierung des Abtastproblems (antialiasing).

Die computergenerierten, hochauflösenden Bilder werden von drei Videoprojektoren (einer je Graphik-Pipeline) auf eine gekrümmte Leinwand projiziert.

4.1.1 Ausgabeeinheiten

Großbild-Projektionsleinwand

Zur Darstellung der virtuellen Umgebung wurde eine halbzyylinderförmige Projektionsleinwand von 3,13 m Höhe und einem Durchmesser von 7 m verwendet. (s. Abb. 4.1)

Die Versuchsperson sitzt im Zentrum der Leinwand, entweder auf einem Stuhl oder auf dem Liegefahrrad, wobei die Augenhöhe je auf 1.25 m konstant gehalten wird (s. Abb. 4.1). Dadurch ergibt sich

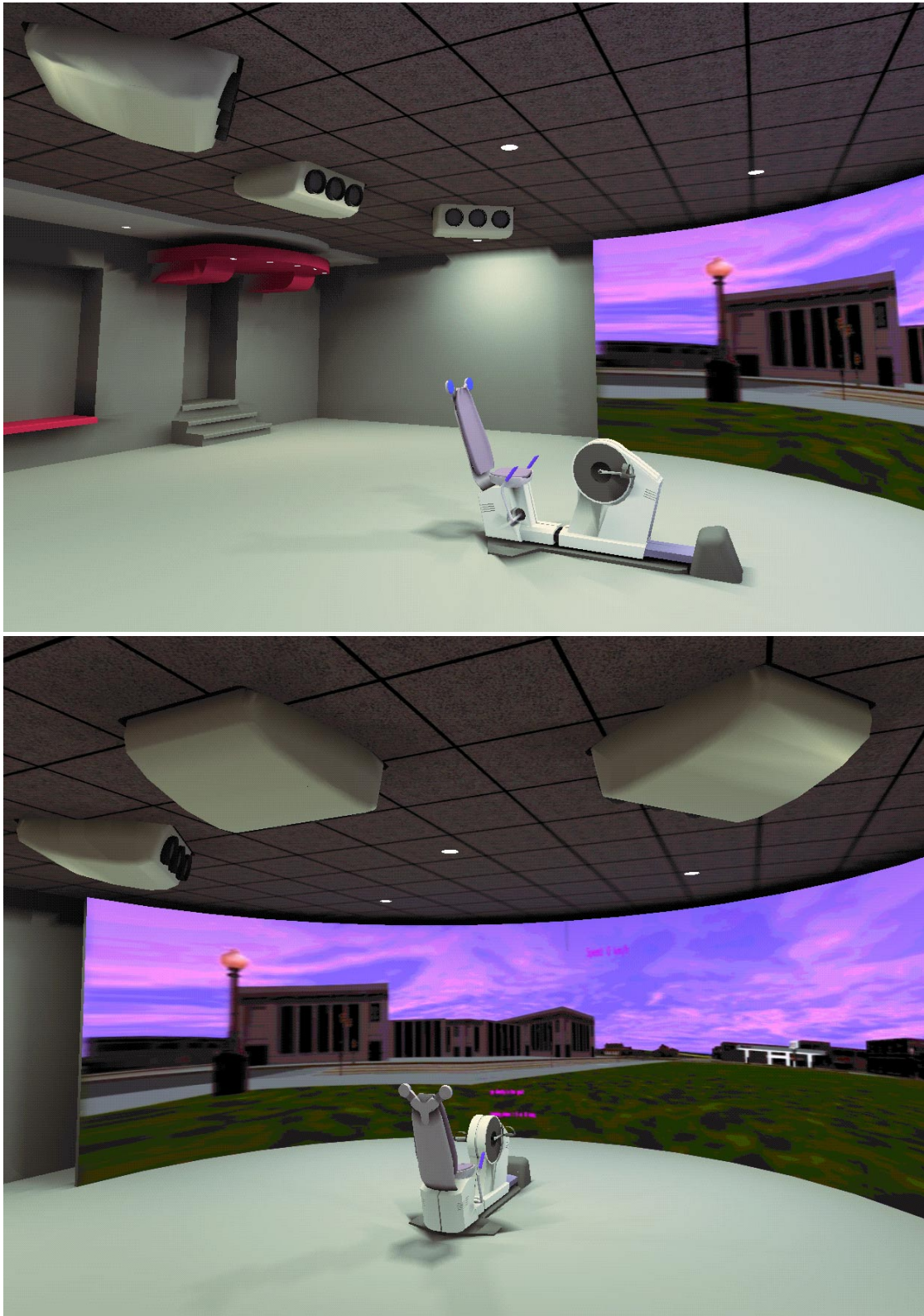


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau im Simulationsraum: VR Bike vor der 180° Projektionsleinwand mit Stadtlandschaft. Oben sind die drei Videoprojektoren zu erkennen.

ein physikalisches Gesichtsfeld (field of view, FOV) von 180° horizontal und 47.9° vertikal, wovon 19.7° des präsentierten Bildes im unteren Gesichtsfeld liegen und die verbleibenden 28.2° im oberen Gesichtsfeld. Das horizontale Gesichtsfeld ist in der Größenordnung des natürlichen Gesichtsfeldes des Menschen, eine Vorteil der Projektionsleinwand gegenüber den in Navigationsexperimenten sonst häufig verwendeten Datenhelmen (head mounted displays, HMDs) oder Monitoren (Burdea & Coiffet, 1994, Kap. 2.5). Dadurch wird auch das periphere Gesichtsfeld stimuliert, was für die Wahrnehmung von Eigenbewegung (vection) aufgrund optischen Flusses ein wichtiger Faktor zu sein scheint (Dichgans & Brandt, 1978).

Simuliertes Gesichtsfeld (FOVs, siehe Fußnote auf Seite 32) und physikalisches Gesichtsfeld (FOV) stimmen dabei überein. Dies ist ein wichtiger Punkt, da bisher unklar ist, welchen Einfluß inkonsistentes simuliertes und physikalisches Gesichtsfeld auf die Raumkognition haben, auch wenn es in anderen Experimenten gelegentlich verwendet wurde (Péruch et al., 1997).

Decke und Boden des Versuchsraumes waren dunkelgrau gehalten, um nicht von der Simulation abzulenken.

Videoprojektoren und Soft-Edge-Blending

Das computergenerierte Bild wird mittels dreier CRT-Projektoren (Electrohome Marquee 8000) von vorne auf die gekrümmte Leinwand projiziert. Je eine Graphik-Pipeline ist dabei mit einem Projektor verschaltet. Die Projektoren haben jeweils einen horizontalen Projektionsbereich von 65° bei einer Auflösung von 1280×1024 Pixeln. Dadurch ergibt sich ein Überlappungsbereich von 7.5° zwischen je zwei benachbarten Bildern. Dieser wird benützt, um unter Einsatz eines Soft-Edge-Blending Systems (Panomaker II von Panoram Technologies) einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Projektionsflächen der Projektoren zu gewährleisten. Die resultierende horizontale Auflösung des Gesamtbildes beträgt etwa 3550 Pixel oder 19.7 Pixel/Grad.

Die Bildwiederholrate¹ der Videoprojektoren betrug konstant 72 Hz, die Bildaktualisierungsrate hingegen war abhängig von der zu rendernden Szenerie und dem verwendeten Bewegungsmodell. Für das Fahrrad- bzw. Mausinterface lag sie bei 24 Hz bzw. 36 Hz für die Stadtlandschaft und bei 36 Hz bzw. 72 Hz für die beiden anderen Szenerien. Die Verzögerung (latency) zwischen vom Benutzer ausgelöster Aktion und Antwort des Systems war im wesentlichen von der Bildaktualisierungsrate bestimmt und lag bei etwa $2 \cdot \text{Bildaktualisierungsrate}^{-1}$. Auf Stereoprojektion und headtracking wurde verzichtet.

¹Die Bildwiederholrate (refresh rate) ist die Frequenz, mit der Bilder von den Videoprojektoren an die Leinwand projiziert werden, also eine Eigenschaft des Ausgabegerätes. Die Bildaktualisierungsrate (update rate) hingegen bezeichnet die Frequenz, mit der neue Bilder gerendert werden, ist also eine Eigenschaft der Simulation selbst.

4.1.2 Eingabemedien und Bewegungsmodell

Die Versuchspersonen konnten sich in der virtuellen Umgebung frei bewegen, mit einer simulierten Eigenbewegung ähnlich wie bei einem Fahrsimulator. Als Eingabemedien dienten dabei entweder die Maustasten oder ein modifiziertes Trainings-Liegefahrrad, dem ein realitätsnahes Bewegungsmodell zugrundeliegt. Die Bewegungsmodelle wurde so gewählt, daß es die Versuchsperson möglichst wenig von der Navigationsaufgabe ablenkt.

Um das Ansteuern eines bestimmten Objektes in der VU zu erleichtern, fügten wir in der Mitte der Leinwand am oberen Rand eine kleine Markierung ein, die die Mitte der Leinwand und dadurch gleichzeitig die momentane Bewegungsrichtung anzeigt² (s. Abb. 4.5).

Maus und Tastatur

Für das Mausbewegungsmodell wurden Bewegungen in der virtuellen Umgebung über die Maustasten gesteuert. Die Tastatur wurde nur benützt, um den nächsten Versuch zu initiieren: Wenn die Versuchsperson meinte, am Ausgangspunkt angekommen zu sein, bestätigte sie dies durch Drücken der Leertaste.

Drücken der linken (rechten) Maustaste initiiert eine Drehung nach links (rechts) in der virtuellen Umgebung³, die solange andauerte, wie die Taste gedrückt blieb.

Vorwärtsbewegungen wurden durch drücken der mittleren Maustaste initiiert, wobei die Bewegung andauerte, solange die Maustaste gedrückt blieb. Durch Loslassen der Taste wurde eine Abbremsphase eingeleitet, die das Risiko für Simulatorkrankheiten⁴ reduzieren sollte, die mit abruptem Anhalten oder Anfahren verbunden sind. Rückwärtsbewegungen waren nicht möglich, um die Vergleichbarkeit mit dem Fahrradbewegungsmodell zu gewährleisten, welches diese naturgemäß nicht gestattete.

Die maximale Translationsgeschwindigkeit betrug 5.2 m/s, ähnlich der typischen Geschwindigkeit beim Fahrrad. Die Beschleunigungsphase für Translationen dauerte etwa 0.5 s und die Abbremsphase 0.3 s, bei jeweils konstanter Beschleunigung. Für die Rotationsbewegung gab es vergleichbare Beschleunigungs- und Abbremsphasen, die jedoch insgesamt etwas länger ausfielen, da Rotationen eher zu Simulatorkrankheiten führen als Translationen. Die maximale Rotationsgeschwindigkeit betrug etwa 40°/s. Die gewählten Parameter stellen einen Kompromiß dar zwischen aufkommender Langeweile durch zu großen Zeitaufwand und der Gefahr von Simulatorkrankheiten. Translations- und Rotationsbewegung konnten kombiniert werden, wovon jedoch interessanterweise nie Gebrauch gemacht wurde.

²Die Markierung stellte eine Art Zielvorrichtung dar, ähnlich "Kimme und Korn".

³D.h. die Sichtpyramide (Frustrum) drehte sich nach links (rechts) in der VU, während sich das Bild auf der Leinwand um den selben Betrag in die entgegengesetzte Richtung drehte.

⁴Symptome von sogenannten "Simulationskrankheiten" (simulator sickness) sind u.a. Übelkeit, Schwindel, Gleichgewichtsstörungen und Kopfschmerzen.

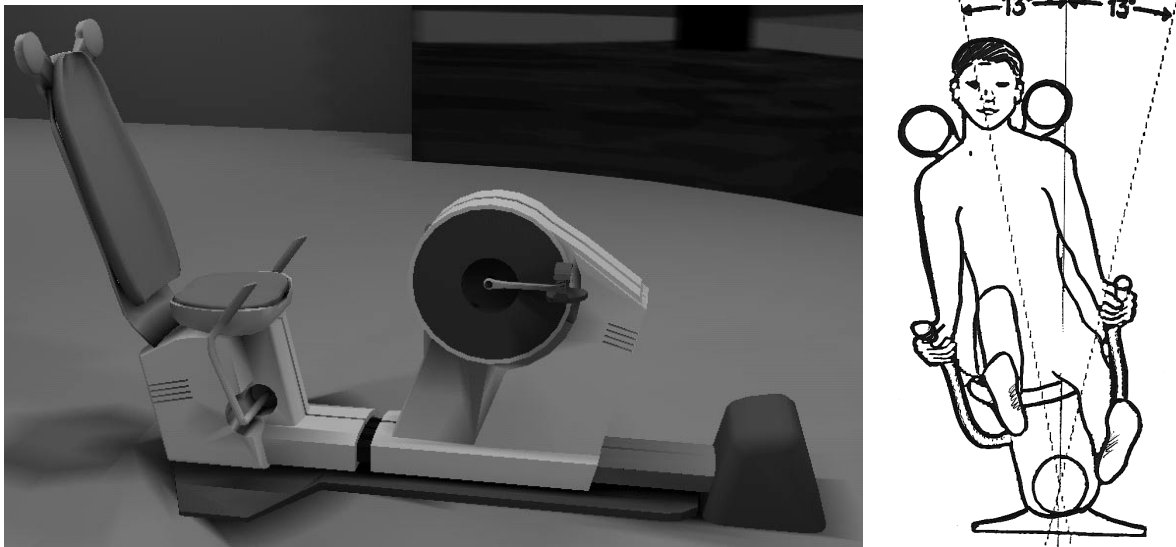


Abbildung 4.2: Das VR Bike. **links:** Seitenansicht mit Projektionsleinwand im Hintergrund. **rechts:** Skizze der Frontalansicht mit Fahrer. Das Liegefahrrad wird über Lenkbewegungen und zusätzlicher Gewichtsverlagerung gesteuert. Der maximale Auslenkwinkel aus der Vertikalen beträgt $\pm 13^\circ$. Die Tretlagerposition läßt sich der Beinlänge des Fahrers anpassen. Der Tretwiderstand ist rechnerkontrolliert.

Fahrrad

Im Gegensatz zum Maus-Interface kommen beim Fahrrad (VR Bike) neben den rein visuellen Reizen noch propriozeptive Reize hinzu: Feedback der Arm- und Beinbewegungen, der zum Treten benötigte Energieaufwand und in begrenztem Maße auch vestibuläre Reize (durch den Neigungswinkel in den Kurven, vgl. Abb. 4.2, rechts). Letztere sind jedoch grundlegend verschieden von denen eines normalen Fahrrades, da keine Zentrifugalkraft simuliert wurden⁵.

Versuchsaufbau allgemein Die Wesentlichen Komponenten des Fahrradsimulators sind in Abb. 4.2 und 4.1 dargestellt. Er besteht aus einem modifizierten Trainingsfahrrad, welches mit einem PC verbunden ist, der wiederum über eine serielle Schnittstelle mit dem Graphikrechner angebunden ist. Das Fahrrad selbst ist eine modifizierte Version des virtual reality exercise bicycle, das von Tectrix und Cybergear vertrieben wird (CyberGear, 1995). Siehe Distler, van Veen, Braun, & Bühlhoff (1997) und Distler (1996) für eine detailliert Beschreibung und Begründung der vorgenommenen Modifikationen.

Bewegungsmodell Das Liegefahrrad wird über Lenkbewegungen und zusätzlicher Gewichtsverlagerung gesteuert (s. Abb. 4.2) und über Treten vorwärtsbewegt, ähnlich einem normalen Liegefahrrad.

⁵Dafür wäre eine Bewegungsplattform nötig, auf die man Fahrrad samt Fahrer stellen müßte.

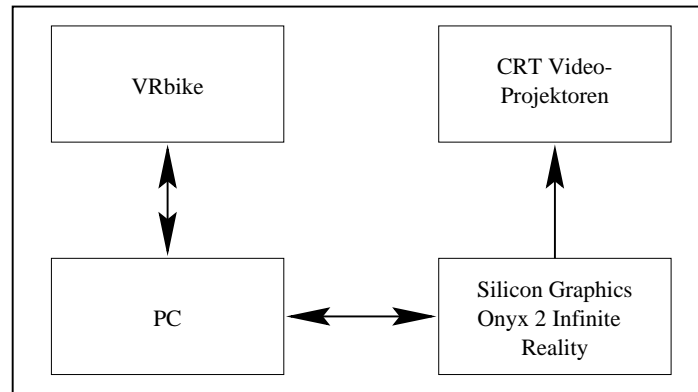


Abbildung 4.3: Die wesentlichen Komponenten des Fahrradsimulators.

Der minimal mögliche Kurvenradius war wie bei einem realen Fahrrad abhängig von der momentanen Translationsgeschwindigkeit. Bei geringen Geschwindigkeiten betrug der minimale Kurvenradius etwa 1,5 Meter und vergrößerte sich mit zunehmender Geschwindigkeit. Für die Experimente wurden zwei verschiedenen Bewegungsmodelle verwendet: Das herkömmliche Fahrradbewegungsmodell erlaubte - ähnlich einem realen Fahrrad - keine Drehungen auf der Stelle (i.e., keine Rotation ohne gleichzeitige Translation). Diese ermöglichte erst das neu entwickelte Fahrradbewegungsmodell, bei welchem man durch Gewichtsverlagerung bzw. Lenkbewegung auf der Stelle drehen konnte, jeweils in die Richtung, in welche man sich neigte. Sobald man wieder vorwärts fuhr, wurde auf das herkömmliche Fahrradbewegungsmodell umgeschaltet. Das neue Fahrradmodell wurde nur in Experiment drei verwendet, um es dort mit dem herkömmlichen zu vergleichen.

An den beiden Handgriffen befinden sich insgesamt 6 Knöpfe, mit denen verschiedene Aktionen ausgelöst werden können (Initialisieren, Schalten, Bremsen, und Wechseln zwischen den verschiedenen Phasen des Experiments). Der Status der Knöpfe, der Lenkwinkel und die Tretgeschwindigkeit werden von einer speziellen I/O Karte im PC ausgelesen. Diese Parameter werden neben anderer⁶ benützt, um die neue Position des Fahrradfahrers in der virtuellen Umgebung zu berechnen, basierend auf einem physikalischen Modell des Fahrrades (Sharp, 1993). Um den neuen Tretwiderstand und die Geschwindigkeit des Fahrrades zu berechnen, werden Information über Reibungskoeffizient des Bodens und Steigung des Terrains aus dem Modell der VU abgefragt.⁷

⁶Weitere Parameter, die in die Berechnung der neuen Position des Fahrradfahrers in der virtuellen Umgebung eingehen, sind die Masse von Fahrrad und Fahrer, Gravitationskonstante, Länge des Fahrrades, Position des Fahrradfahrers bezüglich Vorder- und Hinterrad, gefahrene Distanz per Pedalumdrehung, Windgeschwindigkeit (hier auf Null gesetzt) und ggf. Windrichtung, aerodynamische Größen, Reibungskoeffizient zwischen Fahrrad und Boden sowie die momentane Steigung (entfällt hier).

⁷Hier wurden sowohl der Reibungskoeffizient als auch die Steigung des Terrains konstant gehalten, um die Versuche in den verschiedenen Szenarien untereinander vergleichen zu können.

4.2 Szenerien

Als Versuchsumgebungen für die in Kapitel 5.1 bis 5.4 beschriebenen Experimente wurden drei Szenerien modelliert, die sich in Komplexität, Realismus und dargebotenen Orientierungsmöglichkeiten unterschieden: Ein Punktwolke, eine Stuhllandschaft und eine Stadtlandschaft. Allen dreien ist gemeinsam, daß sie einen freien Platz von mindestens 120 x 120 m Ausdehnung aufweisen, auf dem die Experimente durchgeführt werden. Aufgrund des Szenenwechsels modellierten wir von jeder der drei Versuchsumgebungen zwei Varianten: Eine für den vorgegebenen Weg entlang zweier Dreiecksschenkel, den wir als **“Exkursion”** vom Ausgangspunkt bezeichnen wollen, die andere für den Rückweg, d.h. die eigentliche Homingaufgabe. Die beiden Varianten der jeweiligen Versuchsumgebung waren einander sehr ähnlich (s. Abb. 4.6), hatten jedoch keinerlei räumlichen Bezug zueinander, so daß der Ausgangspunkt in der zweiten Szenerie durch nichts ausgezeichnet war und somit somit nicht **“wiedererkannt”** werden konnte. Dadurch wurde **Piloting** und **“scene matching”** als Homingmethode ausgeschlossen.

In der Exkursion sollten die Versuchspersonen zu einem gelben bzw. blauen **“Lichtkegel”** fahren, der als Zwischenziel die nächste vorgegebene Dreiecksecke darstellte (s. Abb. 4.6 und 4.5). Sobald Sie einen Lichtkegel erreichten, wurde dieser ausgeblendet und die nächste Phase des Experiments eingeleitet.

Motivation

Die Versuchsumgebungen wurden so entworfen, daß sie jeweils bestimmte Navigationsstrategien begünstigten und andere erschwerten. So weisen z.B. die Punktwolke als auch die Stuhllandschaft keine verlässlichen oder salienten Landmarken auf, verhindern also die Verwendung einer ausschließlich auf Landmarken basierten Navigationsstrategie. Andererseits bietet die Punktwolke einen hohen optischen Fluß und dadurch ein starkes Gefühl für Eigenbewegung⁸, was die Verwendung einer geschwindigkeits- oder beschleunigungsbasierte Strategie (Pfadintegration) nahelegt.

In der Punktwolke ist man also auf Pfadintegration beschränkt, während in der Stadtlandschaft zusätzlich **Piloting**, also positionsbasierte Navigation, möglich ist. Die Stuhllandschaft nimmt eine intermediäre Stellung ein: Sie wirkt natürlicher als die sehr artifiziell erscheinende Punktwolke und liefert über die Stühle einen absoluten Größenmaßstab, sie bietet jedoch weniger optischen Fluß. Andererseits weisen die Stühle, die ja die einzigen isolierten Objekte darstellen, keinerlei Salienz untereinander auf, da sie für jeden Versuch zufällig repositioniert und reorientiert werden. Verglichen mit der Stadtumgebung, die eine Fülle an Orientierungspunkten anbietet, ist in der Stuhllandschaft positionsbasierte Navigation somit sehr erschwert.

⁸Dieses Gefühl für **“vection”** zeigte sich übrigens auch dadurch, daß Versuchspersonen in der Punktwolke am ehesten Anzeichen für Simulationskrankheiten zeigten.

4.2.1 Punktwolke

Die rudimentärste der drei Versuchsumgebungen ist die Punktwolke. Sie besteht aus einer mit zufälligen Flecken texturierten Grundfläche von $600 \times 600 \text{ m}$ Ausdehnung. Darüber liegen vier teiltransparente Flächen gleicher Ausdehnung (drei davon liegen oberhalb des Augpunktes), die ebenso mit einem zufälligen Fleckenmuster überdeckt sind (s. Abb. 4.4). Dadurch entsteht bei der Bewegung durch die Punktwolke ein sehr hoher optischer Fluß, ähnlich wie bei der Fahrt durch ein Schneegestöber.

Die einzelnen Flecken ähneln einander und verschwimmen ab einer Entfernung von etwa 10 m , so daß sie nicht als verlässliche Landmarke verwendet werden können. Dadurch ist gewährleistet, daß die Versuchspersonen keine positionsbasierte Navigationsstrategie über mehrere Meter hinweg verwenden können, sie sind also prinzipiell auf Pfadintegration angewiesen.

4.2.2 Stuhllandschaft

Eine Zwischenstellung zwischen der kargen Punktwolke und der realistischen Stadtumgebung nimmt die Stuhllandschaft ein. Sie besteht aus einer rasenartig texturierte Grundfläche von $600 \times 600 \text{ m}$ Ausdehnung, auf der 300 identische Stühle stehen, zufällig in einem Umkreis von etwa 300 m Durchmesser um das Zentrum herum verteilt (s. Abb. 4.5). Die Ausgangsposition ist für jeden Versuch und nach jedem Szenenwechsel im Zentrum des Modells, bei randomisierter Orientierung.

Im Gegensatz zur Punktwolke ist hier über die Stühle eine absolute Größenskala definiert, da Stühle eine wohlbekannte, absolute Größe besitzen.

Die einzelnen Stühle besitzen zwei "level-of-detail"⁹. Dadurch verschwinden die Stühle einerseits, bevor man durch sie hindurch fahren würde. Andererseits erscheinen in einer Entfernung von 80 m neue Stühle, wenn man sich in irgendeine Richtung bewegt. Dadurch wird gewährleistet, daß innerhalb eines Arbeitsbereiches von etwa 100 m Durchmesser in allen Richtungen etwa gleichviele Stühle zu sehen sind, also keine Position oder Orientierung ausgezeichnet und damit wiedererkennbar ist¹⁰. Die große Anzahl an Stühlen ist nötig, um einerseits einen ausreichenden optischen Fluß zu erreichen, andererseits um die Salienz und Wiedererkennbarkeit einzelner Stühle zu reduzieren.

Bei jedem Ausblenden der Szenerie werden Position und Orientierung der einzelnen Stühle als auch der Grundfläche erneut randomisiert. So ist sichergestellt, daß Rückweg und Ausgangsposition nicht durch Objekte identifizierbar sind. Piloting als Navigationsmethode wird dadurch ausgeschlossen, da es keine globalen Orientierungshilfen gibt.

⁹Das detailreichere Modell des Stuhles besteht aus 204 Dreiecken, wird bei einer Entfernung von 4.5 m eingeblendet und bei 35 m in das detailärmere Modell überblendet. Dieses besteht aus nur noch 38 teils texturierten Dreiecken, und wird bei einer Entfernung von 80 m ausgeblendet. Um den Übergang zwischen den zwei Modellen unmerklich zu gestalten werden sie auf einem Entfernungsbereich von 7 m ineinander übergeblendet. D.h., der "fade level of detail range" beträgt 7 m .

¹⁰Man könnte also von einer lokal begrenzten Isotropie und Homogenität der Versuchsumgebung/des Raumes sprechen.

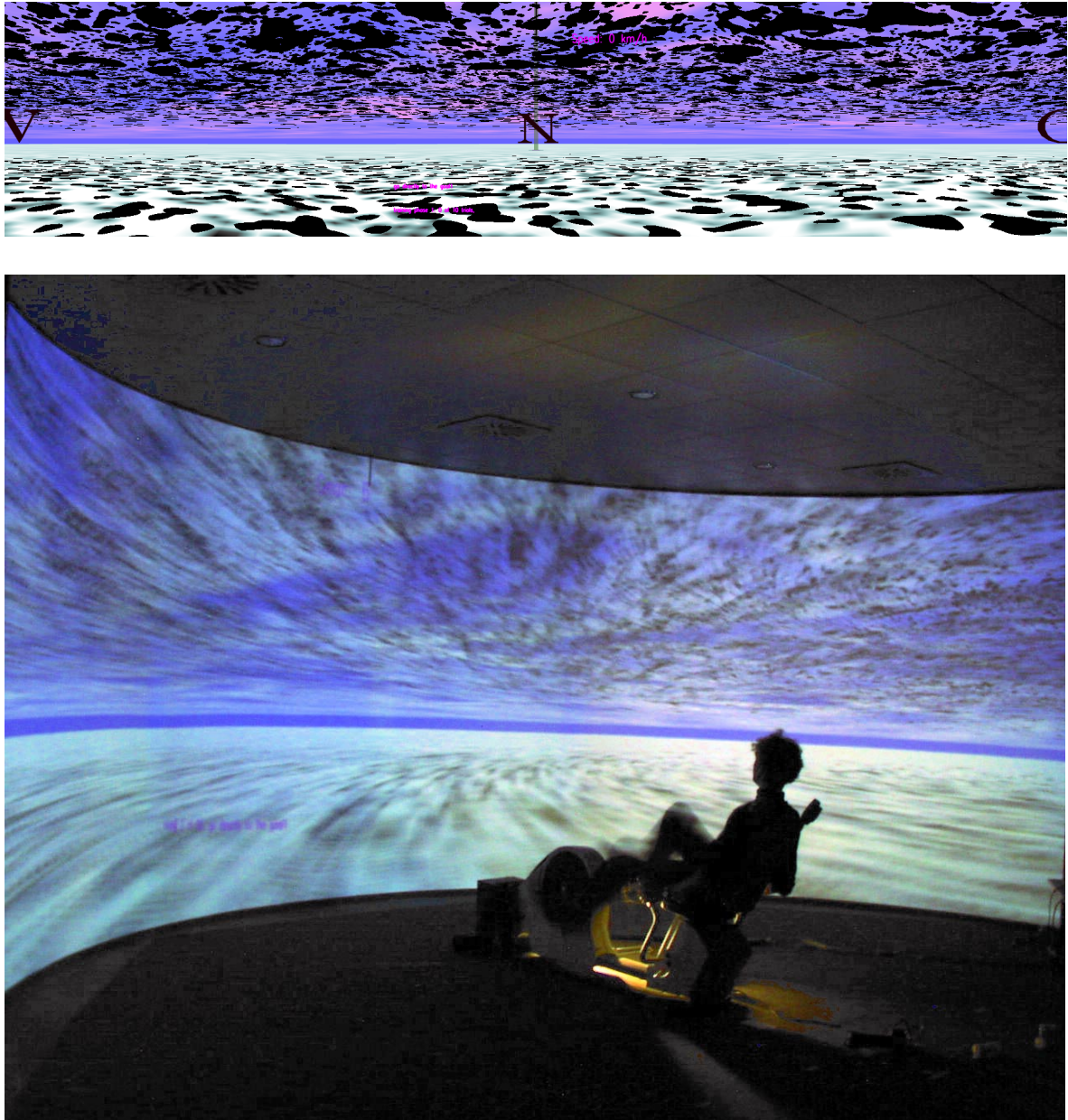


Abbildung 4.4: Punktwolke.

Oben: Punktwolke unter 180° FOV: Als Orientierungshilfe sind während der Trainingsphase 1 die "Himmelsrichtungen" eingeblendet (N, S, O, W).

Unten: Punktwolke "in Aktion". Deutlich erkennbar ist der hohe optische Fluß, der einen hohen Grad anvection (Gefühl für Eigenbewegung) erzeugt.

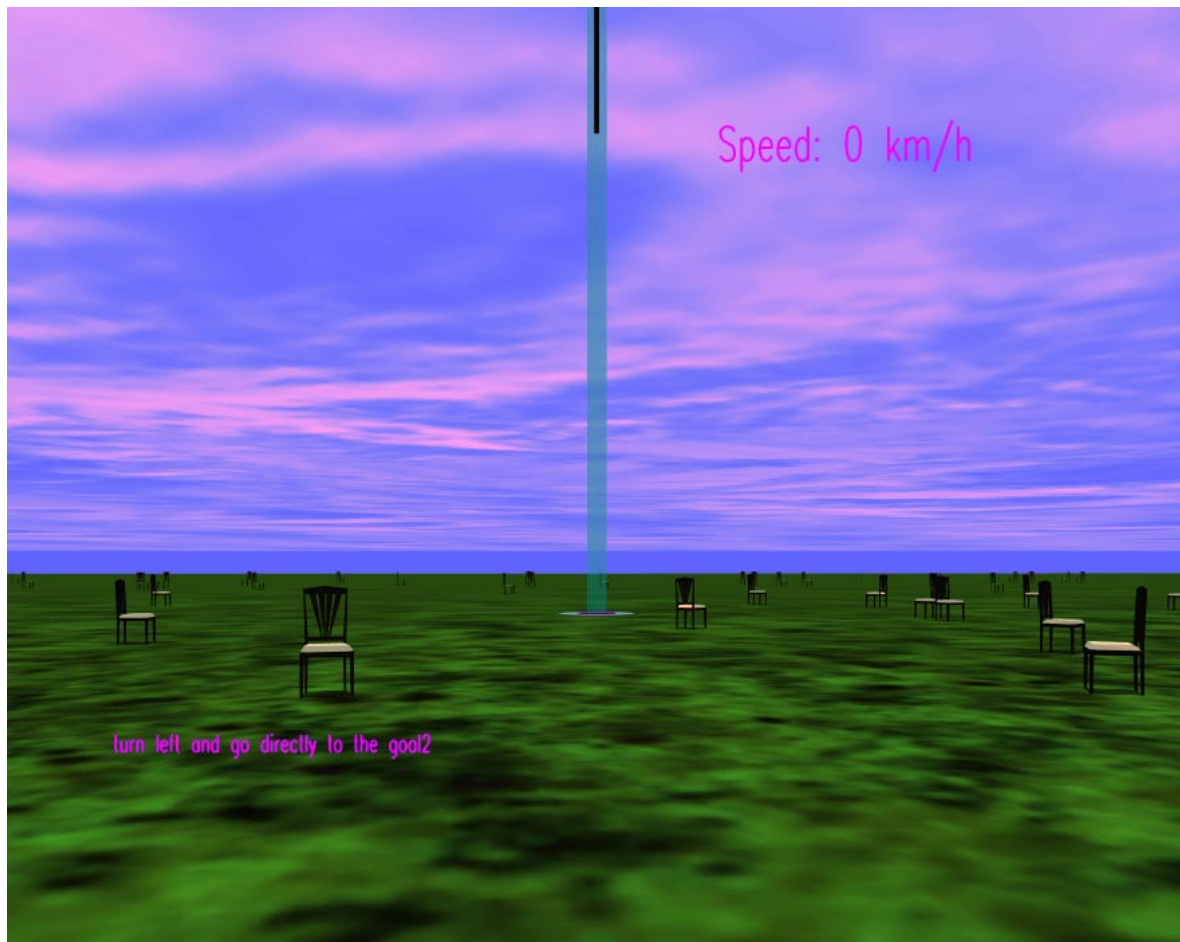


Abbildung 4.5: Die Stuhllandschaft, bestehend aus randomisiert auf einer "Wiese" stehenden Stühlen. In der Mitte des Bildes ist die zweite Dreiecksecke zu sehen, symbolisiert durch den blauen Lichtkegel. Die Geschwindigkeit (rechts oben im Bild) ist nur während der Trainingsphase eingeblendet. Links unten im Bild sind die Anweisungen an die Versuchsperson eingeblendet ("turn left and go directly to the goal2"). Der abgebildete Ausschnitt entspricht 60° FOV.

4.2.3 Stadtlandschaft

Die natürlichste der drei Umgebungen stellt die Stadtlandschaft dar. Sie besteht aus zwei ähnlichen Modellen einer Kleinstadt, die jeweils so gestaltet sind, daß sie einen freien rechteckigen Platz aufweisen, auf dem die Experimente stattfinden (s. Abb. 4.6). Auf dem ersten, kleineren Platz (Platz A) von etwa 120 m Durchmesser fand die Exkursion statt (s. Abb. 4.6, Mitte). Der zweite Platz, (auf dem die Heimfindeaufgabe durchgeführt wurde) war etwa doppelt so groß wie der erste Platz, um genügend Freiraum für den “Nachhauseweg” zu schaffen (s. Abb. 4.6, unten).

Die beiden Plätze bestanden je aus einer freien Rasenfläche, ringsum umgeben von einer Straße, eingefafßt von Häusern (s. Abb. 4.6, Mitte und unten). Die Gebäude auf beiden Plätzen waren teils identisch, um einen verläßlichen Größenmaßstab zu definieren. Aus Effizienzgründen waren die Gebäude der Stadtlandschaft mit level-of-detail switches versehen.

Die Stadtlandschaften stellen eine natürliche Umgebung dar, mit einer Fülle verläßlicher und salienter Landmarken. *Innerhalb* einer Stadt¹¹ ist also Piloting möglich, und durch den rechtwinkligen Grundriß der beiden Plätze ist intuitive Navigation möglich.

Um zu verhindern, daß die Versuchspersonen eine schnappschußbasierte Strategie (also reines “scene matching”) zum Wiederauffinden des Ausgangspunktes verwenden können, wurden sie (außer im Kontrollexperiment) für die Heimfindeaufgabe von der ersten in die zweite Stadtlandschaft versetzt, um dort den Rückweg anzutreten.

4.3 Software

Modellierung

Die dreidimensionalen Modelle der virtuellen Umgebung wurden mit Multigen 3D Modelling Software, Version 1.5.0 und Medit 3D Modelling Software, Version 2.0.g erstellt. Die Stadtumgebung ist ein von uns modifiziertes Modell der von Silicon Graphics mitgelieferten “Performertown”.

Programmierung

Die Simulationsprogramme wurden vom Autor in der Programmiersprache C++ geschrieben. Für die Echtzeit-Simulationen kamen Vega 3.2, LynX 3.2 und Performer 2.2 zum Einsatz.

Auswertung

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse wurde in Matlab V5.1 programmiert, ebenso die Graphiken. Die Varianzanalysen wurden mit dem Unix-Programm *anova* durchgeführt.

¹¹d.h. bis zum nächsten Szenenwechsel



Abbildung 4.6: Verschiedene Ansichten der Stadtlandschaft.

Oben: Ansicht aus dem Experiment (Trainingsphase). **Mitte:** Überblicksbild von Platz A (Exkursion). **Unten:** Überblicksbild des doppelt so großen Platz B (Rückweg).

4.4 Design des Experiments

Beim Hauptexperiment handelte es sich um einen gemischten within-subject und between-subject Versuchsplan, der sich aus der systematischen Variation von zehn Dreiecksgeometrien ($\alpha = -150^\circ, -120^\circ, -90^\circ, -60^\circ, -30^\circ, +30^\circ, +60^\circ, +90^\circ, +120^\circ$ und $+150^\circ$) innerhalb eines experimentellen Block zusammensetzte. Zwischen den experimentellen Blöcken wurde im Hauptexperiment für 6 Versuchspersonen das Bewegungsmodell (Fahrrad und Maus) und für 4 Versuchspersonen die Szenerie (Punkte-, Stuhl- und Stadtlandschaft) balanciert variiert. Diese beiden Gruppen, die wir getrennt analysierten, werden im folgenden als **“Bewegungsmodell-Gruppe”** bzw. **“Szenerie-Gruppe”** bezeichnet (s. Tab. 4.1). Je zwei Versuchspersonen durchliefen dieselben experimentellen Blöcke in entgegengesetzter Reihenfolge.

	Kontrollparameter (unabh. Var.)				Meßgröße (abh. Var.)	
	VP	Bewegungsmodell: Maus-Bike	Szenerie	Dreiecks-Geometrie: Winkel α	Winkel-fehler $\beta_s - \beta_m$	Distanz-fehler $s_{3_m} - s_{3_s}$
Bewegungsmodell-Gruppe	6	2 within	3 between	10 within	2 x 60	2 x 60
Szenerie-Gruppe	4	2 between	3 within	10 within	3 x 60	3 x 60

Tabelle 4.1: Übersicht über das experimentelle Design des Hauptexperiments.

Jeder experimentelle Block bestand aus einer Kombination von Bewegungsmodell und Szenerie und umfaßte 60 Versuche (10 verschiedene Winkel α x 6 Wiederholungen) in randomisierter Reihenfolge. Für das Hauptexperiment ergibt dies ein $10 \times 2 \times 3$ faktorielles Design (10 Winkel α x 2 Bewegungsmodelle x 3 Szenerien, vgl. Tab. 4.1).

Das horizontale FOV wurde nur im FOV-Experiment systematisch variiert und betrug sonst konstant 180° .

Nomenklatur und Verhaltensmaße

Die für die Beschreibung der Dreiecksgeometrie verwendeten Bezeichnungen sind der Übersichtlichkeit halber in Abbildung 4.7 graphisch dargestellt. Das korrekte Dreieck wird vom Startpunkt \vec{x}_0 , dem ersten Zielpunkt \vec{x}_1 und dem zweiten Zielpunkt \vec{x}_2 aufgespannt. Die Anfangsorientierung der Versuchsperson (und damit die Orientierung des ersten Dreieckssegments s_1) war stets in Richtung der positiven y -Achse (“Norden”).

Die Dreiecksschenkel werden mit s_1, s_2 sowie s_3 bezeichnet, die Innenwinkel mit α und β . Der Innenwinkel α wird für die Linksdrehung negativ gerechnet, für die Rechtsdrehung positiv. Die Drehwinkel

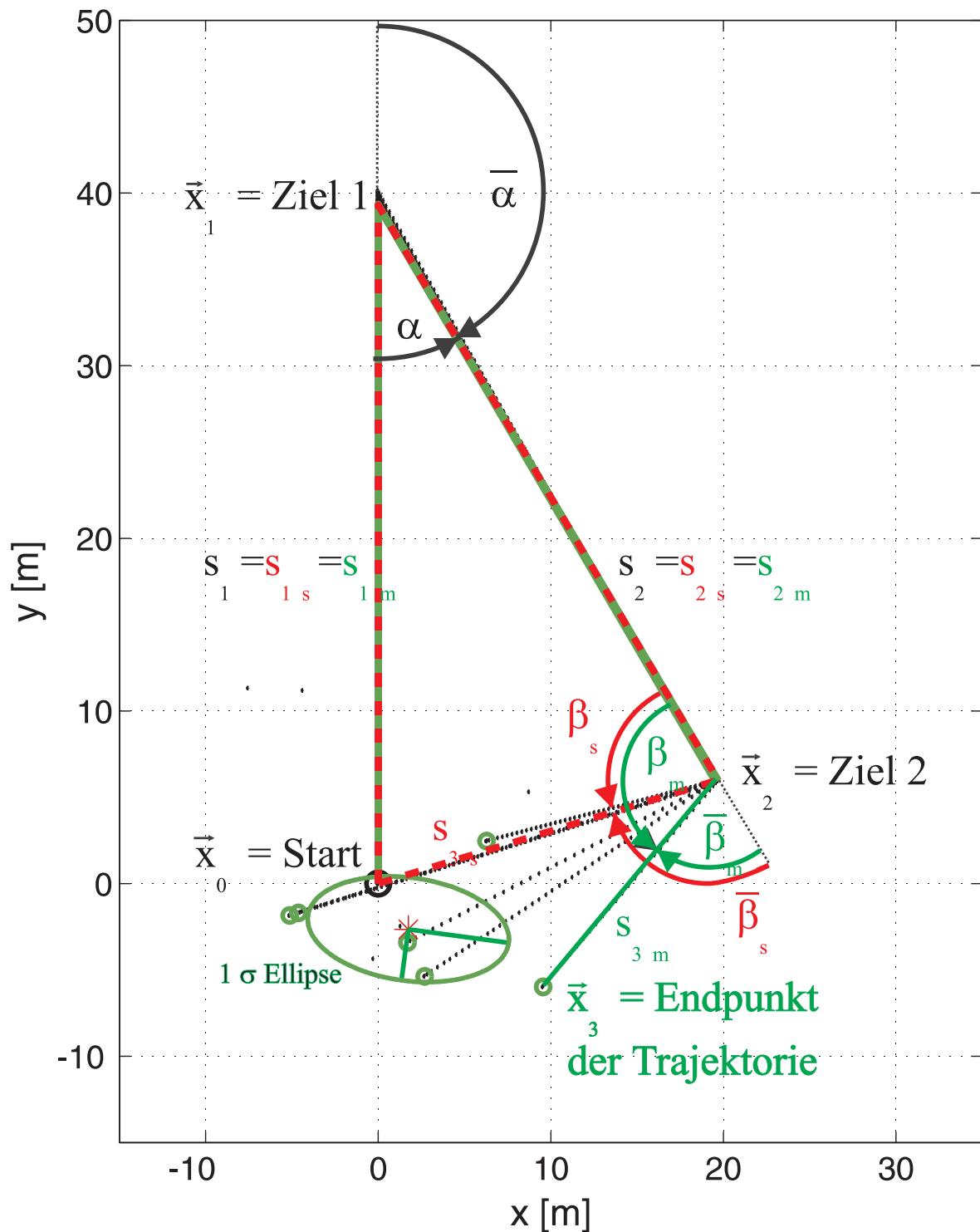


Abbildung 4.7: Nomenklatur des Dreiecks anhand der graphischen Darstellung eines typischen Versuchsergebnisses für $\alpha = 30^\circ$. Erläuterungen im Text.

(Gegenwinkel) werden mit $\bar{\alpha} \equiv 180^\circ - |\alpha|$ bzw. $\bar{\beta} \equiv 180^\circ - |\beta|$ bezeichnet. Das Dreieck war gleichschenkelig, die Länge der ersten beiden Dreiecksschenkel betrug konstant $s_1 \equiv s_2 \equiv 40m$. Für die ersten beiden Dreiecksschenkel (s_1 und s_2) und den Winkel α zwischen ihnen stimmen die korrekten Werte (s_{1_s} , s_{2_s} und α_s ; "s" steht für "soll") mit den gemessenen Werten (s_{1_m} , s_{2_m} und α_m ; "m" steht für "Meßwert") für die Versuchsperson überein, da ja die Eckpunkte vorgegeben waren.

Um die Verteilung der beobachteten Endpunkte $\overrightarrow{x_{3_m}}$ der Trajektorie zu charakterisieren wurde in Abbildung 4.7 eine 1σ Vertrauensellipse gelegt. Der Mittelpunkt der Ellipse stellt das arithmetische Mittel der Verteilung dar. Die Richtung der beiden Halbachsen gibt die Richtung der minimalen und maximalen Ausdehnung der Verteilung an. Der Betrag der Halbachsen der 1σ Vertrauensellipse gibt die Standardabweichung bezüglich der entsprechenden Richtung an. Die Vertrauensellipse wurde in der Analyse benutzt, um "Ausreißer" in den Meßwerten verlässlich eliminieren zu können (s. S. 64).

Um die Trajektorien der Versuchsperson in der virtuellen Umgebung nachvollziehen zu können, wurden Orts- und Geschwindigkeitsvektor für jedes dritte gerenderte Bilder¹² aufgezeichnet.

Als quantitatives Maß für den Homingfehler verwendeten wir den Winkel- und Distanzfehler, d.h. die Abweichung des beobachteten Wertes vom korrekten (Soll)-Wert im Drehwinkel ($\beta_s - \beta_m$) und in der Distanz (Luftlinie) ($s_{3_m} - s_{3_s}$). Eine Alternative wäre gewesen, die Abweichung vom Ausgangspunkt ($\overrightarrow{x_{3_m}} - \overrightarrow{x_0}$) in kartesischen Koordinaten zu verwenden. Der Grund für unsere Wahl war, daß Drehwinkel und Distanz eher den bei der Dreiecksvervollständigung auftretenden Verhaltensentscheidungen entsprechen: Erstens "wie weit soll ich mich drehen?" Zweitens "wie weit soll ich fahren?" Zudem ist diese Unterteilung in Winkel- und Distanzfehler in der Literatur nicht unüblich.

Vergleich mit dem experimentellen Design von Loomis et al. (1993) und Péruch et al. (1997)

Im Gegensatz zu den Studien von Loomis et al. (1993) und Péruch et al. (1997) variierten wir den Winkel α in 10 Schritten, nicht aber die Länge der Segmente s_1 und s_2 . In ihren Dreiecksvervollständigungsexperimenten benützten Loomis et al. (1993) ein $3 \times 3 \times 3$ faktorielles Design, indem sie unabhängig s_1 , s_2 (je 2, 4, und 6 m) und α (60° , 90° und 120°) variierten.

Péruch et al. (1997) verzichteten auf die Variation des ersten Dreiecksschenkels s_1 , hatten jedoch als dritten unabhängigen Parameter das simulierte visuelle Feld variiert, verwendeten somit ebenfalls ein $3 \times 3 \times 3$ faktorielles Design: 3 Winkel ($\alpha = 60^\circ$, 90° und 120° wie bei Loomis et al. (1993)) \times 3 Längen von Segment 2 ($s_2 = 10, 20$ und $30m$) \times 3 Werte des horizontalen FOVs (40° , 60° und 80°).

4.5 Ablauf des Experiments

Der Ablauf des Experiments ist in Abb. 4.8 schematisch dargestellt. Vor ihrem ersten Experiment be-

¹²d.h. alle drei "frames". Die Samplingrate war also von der Bildaktualisierungsrate (update rate) abhängig, betrug also zwischen 8 und 24 Hz.

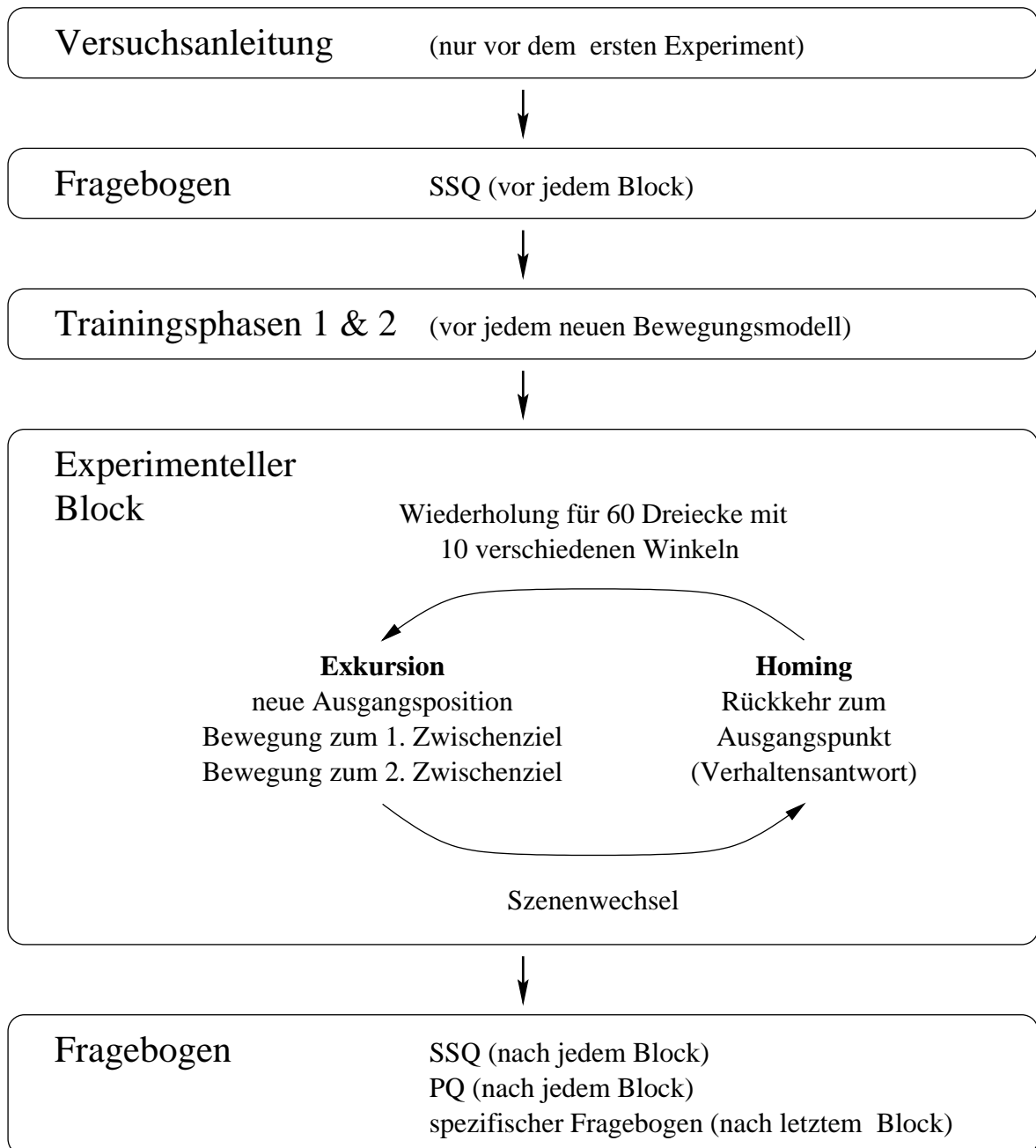


Abbildung 4.8: Ablauf des Experiments. Erläuterungen im Text.

kam jede Versuchsperson die Versuchsanleitung zu lesen (s. Anhang B.1), in welcher der Versuchsablauf und das Interface beschrieben waren. Um zu überprüfen, ob die Experimente bei den Versuchspersonen typische Symptome von Simulatorkrankheiten wie Unwohlsein, Gleichgewichtsstörungen und Schwindel hervorruft, füllten sie vor und nach jedem Experiment einen standardisierten Fragebogen zu Simulatorkrankheiten (simulator sickness questionnaire, SSQ) aus (Kennedy, Lane, Lilienthal, Berbaum, & Lawrence, 1992), der im Anhang B.2 abgedruckt ist. Um den Einfluß höherer kognitiver Prozesse (wie Bewegungswahrnehmung, Vergessen der Außenwelt etc.) zu untersuchen, füllten die Versuchspersonen nach jedem Experiment einen standardisierten "Präsenz"-Fragebogen (presence questionnaire, PQ) aus (Singer, Allen, McDonald, & Gildea, 1997), s. Anhang B.3. Im Anschluß an den letzten Teil des Hauptexperiments füllte jede Versuchsperson zusätzlich einen von uns entwickelten Fragebogen aus, in dem unter anderem nach verwendeten Strategien und einer Beurteilung des Experiments gefragt wurde (s. Anhang B.4).

Jeder experimentelle Block gliederte sich in zwei Phasen: eine Trainingsphase und eine Testphase.

Trainingsphase

Vor ihrem ersten Experiment durchliefen alle Versuchspersonen eine zweiteilige Trainingsphase von typischerweise 45 Minuten Dauer. Dadurch hatten die Versuchspersonen einerseits genügend Zeit zur Gewöhnung an die virtuelle Umgebung und das Interface, andererseits wurde so ein vergleichbarer Grad an Kompetenz im Umgang mit der Versuchsumgebung gewährleistet¹³.

Die Versuchspersonen, die als Bewegungsmodell sowohl Fahrrad als auch Maus verwendeten, durchliefen für das jeweils zweite Bewegungsmodell eine erneute Trainingsphase direkt vor dem entsprechenden Experiment.

Die Trainingsphase unterschied sich von der Testphase nur durch zusätzliches Feedback, worüber ein ständiges Verbessern der Leistung möglich war. Während der gesamten Trainingsphase war der Experimentator anwesend, um etwaige Fragen zu beantworten und sicherzustellen, daß die Versuchspersonen die Aufgabe richtig verstanden hatten. Für die Testphase wurde die Versuchsperson dann allein gelassen, konnte jedoch über eine Überwachungskamera beobachtet werden.

Beide Trainingsphasen bestanden aus jeweils zehn Heimfindaufgaben (s. S. 58), wobei in Phase 1 kontinuierliches Feedback gegeben wurde, in Phase 2 nur noch am Ende jeder Heimfindaufgabe. Nach der Trainingsphase waren allen Versuchspersonen mit der Umgebung und dem experimentellen Ablauf vertraut und hatten keine Probleme mehr mit dem Bewegungsmodell.

Trainingsphase 1 Während des ersten Teils der Trainingsphase wurde als Orientierungshilfe die Himmelsrichtungen (N, S, O, W) in die Szenerie eingeblendet (s. Abb. 4.4 und 4.6, oben), wobei

¹³Dennoch zeigte sich in den Experimenten gelegentlich ein Lerneffekt.

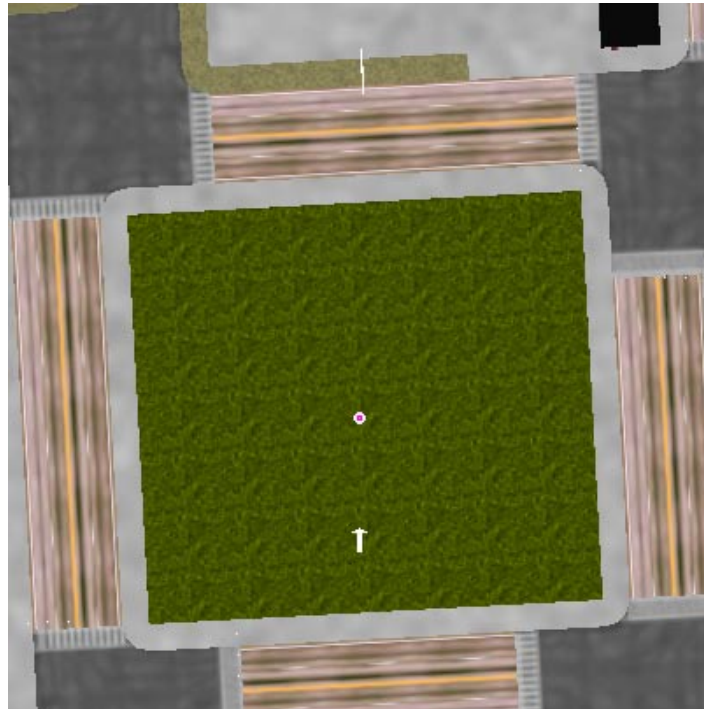


Abbildung 4.9: Darstellung des Übersichtsbildes (hier für die Stadtlandschaft), welches auf einem separaten Monitor während der Trainingsphase eingeblendet war.

Norden durch die jeweilige Orientierung am Ausgangspunkt definiert war. Vorversuche hatten ergeben, daß Versuchspersonen ohne eine solche globale Orientierungshilfe anfangs große Probleme haben, sich überhaupt in der virtuellen Umgebung zurechtzufinden.

Als weitere Orientierungshilfe wurde auf einem separaten Monitor ein Blick aus der Vogelperspektive auf die Szenerie eingeblendet (s. Abb. 4.9). Auf diesem konnte die Versuchsperson ihre momentane Position und Orientierung sehen (symbolisiert durch einen weißen Pfeil), sowie die Lage der gerade sichtbaren Dreieckspunkte (symbolisiert durch die beiden Lichtkegel). Diese Navigationshilfen trugen den Forderungen nach zusätzlichen Orientierungshilfen in VU Rechnung, die sich u.a. aus den Studien von Darken & Sibert (1996) und Ruddle et al. (1997) ergeben. Versuchspersonen neigen sonst leicht zu Desorientierung und dem Gefühl des Verlorenseins, wenn sie sich zum ersten Mal durch eine unbekannte virtuelle Umgebung bewegen.

Trainingsphase 2 In der zweiten Lernphase wurde die zusätzliche Orientierungshilfe während der Navigation ausgeschaltet. Erst beim Erreichen des gedachten Ausgangspunktes wurde die Rückmeldung über die eigene Position und Orientierung auf dem Überblicksmonitor kurz eingeblendet. Diese Navigationsphase war mit der des eigentlichen Experimentes identisch, die Versuchspersonen konnten jedoch ihr Verhalten durch das Feedback verbessern.

Testphase

Direkt nach der Trainingsphase begann das eigentliche Experiment. Die Versuchspersonen wurden hierfür in eine randomisierte Position und Orientierung in der virtuellen Umgebung ausgesetzt, und hatten dann für jedes Dreieck die folgenden Aufgaben:

1. Bewegung zum ersten Ziel

Versuchspersonen sollten direkt zum ersten Ziel fahren (die erste Dreiecksecke), dargestellt durch eine halbtransparente gelbe Lichtsäule (ähnlich einem Beamstrahl in diversen science fiction Filmen, s. Abb. 4.6).

2. Bewegung zum zweiten Ziel

Sobald die Versuchsperson die gelbe Lichtsäule erreicht hatten, verschwand diese¹⁴ und das zweite Ziel erschien als blaue Lichtsäule (s. Abb. 4.5). Da das zweite Ziel außerhalb des Gesichtsfeldes liegen konnte und damit nicht direkt sichtbar, wurde dessen Richtung (links/rechts) als Text auf der Leinwand eingeblendet (s. Abb. 4.5). Die Versuchsperson war wieder angewiesen, auf direktem Weg zur Lichtsäule zu fahren, die bei Erreichen ebenso wie die vorige verschwand.

3. Heimfindaufgabe

Nach Erreichen des zweiten Ziels wurde die gesamte Szenerie ausgeblendet. In der Dunkelphase wurde die Szenerie ausgetauscht¹⁵, dann wurde die (neue) Szenerie wieder eingeblendet. Die Versuchsperson befand sich im Zentrum der neuen Umgebung, mit randomisierter Orientierung.

Die eigentliche Aufgabe bestand nun darin, auf möglichst direktem Wege zum Ausgangspunkt zurückzufahren. Es kam dabei nicht auf Geschwindigkeit an, sondern nur auf Genauigkeit.

Durch das Auswechseln der Szenen hatte die Versuchsperson keine Möglichkeit, sich an irgendwelchen Landmarken zu orientieren, sie konnte sich nur auf ihre mentale Repräsentation, z.B. in Form eines Heim-Vektors, verlassen. Nur im zweiten Experiment, dem Kontrollexperiment (s. Kap. 5.3.5) wurde die Szenerie nicht ausgetauscht, da wir sicherstellen wollten, daß die Heimfindaufgabe unter "normalen" Umständen lösbar war und wir einen Vergleichsmaßstab haben wollten.

Wenn die Versuchsperson meinten, am Ausgangspunkt angelangt zu sein, bestätigten sie dies durch Tastendruck, und ein neuer Versuchsdurchlauf begann. Der Ablauf in der Trainingsphase war bis auf das zusätzliche Feedback derselbe wie in der Testphase.

¹⁴Die Lichtsäule hatte einen Radius von 0.5 m und verschwand nur, wenn man direkt durch sie hindurchfuhr, sie also mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5\text{ m}$ traf.

¹⁵Der Szenenwechsel fand im dunkeln statt, um eine Scheinbewegung ("apparent motion") der Szenerie auszuschließen.

Insgesamt wurden pro Experiment 6 Blöcke zu je 10 Versuchen (Dreiecken mit verschiedenen Winkeln) durchlaufen. In den Pausen zwischen den Blöcke konnte die Versuchsperson für einen Moment entspannen.

4.6 Versuchspersonen

Versuchspersonen waren vor allem Studenten, aber auch Schüler und Berufstätige im Alter von 17 bis 35 Jahren. Die Teilnahme an den Experimenten war freiwillig und wurde bezahlt. Aus Datenschutzgründen wurden die Namen der Versuchspersonen mit vier Buchstaben verschlüsselt. Um auf das Ergebnis einer einzelnen Versuchsperson zu verweisen werden diese vier Buchstabe kursiv gestellt, z.B. Versuchsperson *betu*. Im folgenden wird auf Versuchspersonen in weiblicher Form Bezug genommen, unabhängig von deren Geschlecht.

Das Hauptexperiment führten zehn Versuchspersonen durch, eine in jeder der experimentellen Zellen. Je Kombination von Szenerie und Bewegungsmodell ergibt dies vier Versuchspersonen. Bei drei weiteren Versuchspersonen mußte das Experiment abgebrochen werden, da sie Anzeichen von Simulatorkrankheit zeigten.

Am Kontrollexperiment ohne Szenenwechsel nahmen vier Versuchsperson teil, am Vergleichsexperiment zwischen den beiden Fahrradbewegungsmodellen drei Versuchspersonen, von denen eine (*betu*) nicht in die Auswertung aufgenommen wurde, da sie eine offensichtlich inkonsistente mentale Repräsentation des Dreiecks hatte. Siehe Kapitel 5.3 für eine detaillierte Beschreibung des Falls. Am vierten und letzten Experiment, in dem das Gesichtsfeld variiert wurde, nahmen vier Versuchspersonen teil, die bereits an früheren Experimenten teilgenommen hatten.

Um einzelne Effekte genauer zu untersuchen müßte die Anzahl der Versuchspersonen erhöht werden, was jedoch den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte.

Kapitel 5

Experimente: Motivation, Ergebnisse und Diskussion

Das Hauptziel unserer Experimente war die Untersuchung der Charakteristika des Raumwissens, welches durch vorwiegend visuelle Stimuli bei Dreiecksvervollständigungsarbeiten in VU erlangt wurde. Um unsere Ergebnisse mit den Studien von Loomis et al. (1993) zur nichtvisuellen Dreiecksvervollständigung in realen Umgebungen und denen von Péruch et al. (1997) zur rein visuellen Dreiecksvervollständigung in VU vergleichen zu können verwendeten wir ähnliche Dreiecksgeometrien.

5.1 Hauptexperiment

5.1.1 Motivation

Im Hauptexperiment wurde einerseits untersucht, welchen Einfluß die Verfügbarkeit verschiedener Informationsquellen auf das Navigationsvermögen der Versuchspersonen hat. Jede der drei Versuchsumgebungen (Punkte-, Stuhl- und Stadtlandschaft) bot verschiedenartige Informationsquellen und begünstigte dadurch die Verwendung bestimmter Strategien und Vorgehensweisen (s. Kap. 3).

Andererseits waren wir am Einfluß des Bewegungsmodells, des Eingabemediums und damit auch der Propriozeption auf das Navigationsvermögen interessiert. Hierfür verglichen wir ein einfaches mausbasiertes Bewegungsmodell mit einem komplexeren fahrradbasierten Bewegungsmodell. Beim Mausbewegungsmodell wurde die simulierte Eigenbewegung über die drei Maustasten gesteuert; es gab also praktisch keine propriozeptiven Reize. Das Fahrradbewegungsmodell hingegen bot gewisse propriozeptive und vestibuläre Reize: Distanzen konnten ähnlich wie bei einem realen Fahrrad über sensomotorische Reize, die Anzahl der Pedalumdrehungen und den Energieaufwand abgeschätzt werden. Drehwinkel konnten über sensomotorische Reize (Lenkbewegungen) und über vestibuläre

Information (Lenkbewegungen waren an “sich-in-die-Kurve-legen” gekoppelt) abgeschätzt werden. Gegenüber dem Mausinterface bot das Fahrradinterface somit neben den identischen visuellen Stimuli zusätzliche propriozeptive und gewisse vestibuläre Informationen, war aber gleichzeitig von höherer Komplexität.

Der dritte Komplex an Fragestellungen drehte sich um die verwendeten Dreiecksgeometrien. Werden bestimmte Drehwinkel korrekter kodiert als andere? Erleichtern rechte Winkel die Raumkognition? Werden wir auch die von Loomis et al. (1993) und Péruch et al. (1997) beobachtete Kompression der Verhaltensantworten finden?

5.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden werden wir die Ergebnisse des Hauptexperimentes vorstellen. Nach einigen Beobachtungen zum Zeitbedarf der einzelnen Experimente werden wir die bei der Dreiecksvervollständigung gefahrenen Trajektorien untersuchen und zwischen den beiden Bewegungsmodellen vergleichen.

Zeitbedarf

Für einen Block des Experiments, also 60 Dreiecke, benötigten die Versuchspersonen im Mittel 69 ± 4 Minuten¹, wobei es einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Bewegungsmodellen gab. Für das Mausbewegungsmodell lag die mittlere benötigte Zeit deutlich unter einer Stunde (53 ± 3 Minuten), für das Fahrradbewegungsmodell deutlich darüber (84 ± 5 Minuten). Die Unterschiede stammten von den längeren Beschleunigungsphasen, und den im Mittel geringeren Translations- und Rotationsgeschwindigkeiten². Die Versuchspersonen wurden in der Lernphase instruiert, daß es bei den Experimenten nicht auf Geschwindigkeit, sondern nur auf Genauigkeit ankomme (vgl. Versuchsanleitung im Anhang B.1).

Trajektorien - Unterschiede zwischen den beiden Bewegungsmodellen

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Bewegungsmodellen läßt sich direkt an den gefahrenen Trajektorien ablesen (s. Abb. 5.1):

Mit dem **Mausbewegungsmodell** fuhren die Versuchspersonen stets entweder geradeaus, oder sie drehten sich. Gleichzeitiges Translatieren und Rotieren wurde nie beobachtet, obwohl das Bewegungsmodell es durchaus erlaubte und die Versuchspersonen dies auch wußten. Befragung der Versuchspersonen nach der Ursache dieses Fortbewegungsverhaltens ergab, daß sie es als einfacher empfanden, nicht gleichzeitig auf Position und Orientierung im Raum achtgeben zu müssen. Diese Beobachtung bestätigt unsere Auswertungsmethode, Dreh- und Distanzfehler getrennt zu analysieren.

¹ ± 4 bezeichnet den Standardfehler des Mittelwerts (standard error of the mean).

²Dieser Zeitunterschied war nicht intendiert gewesen. Es zeigte sich, daß die Versuchspersonen mit dem Fahrrad im Mittel wesentlich langsamer fuhren als der Experimentator.

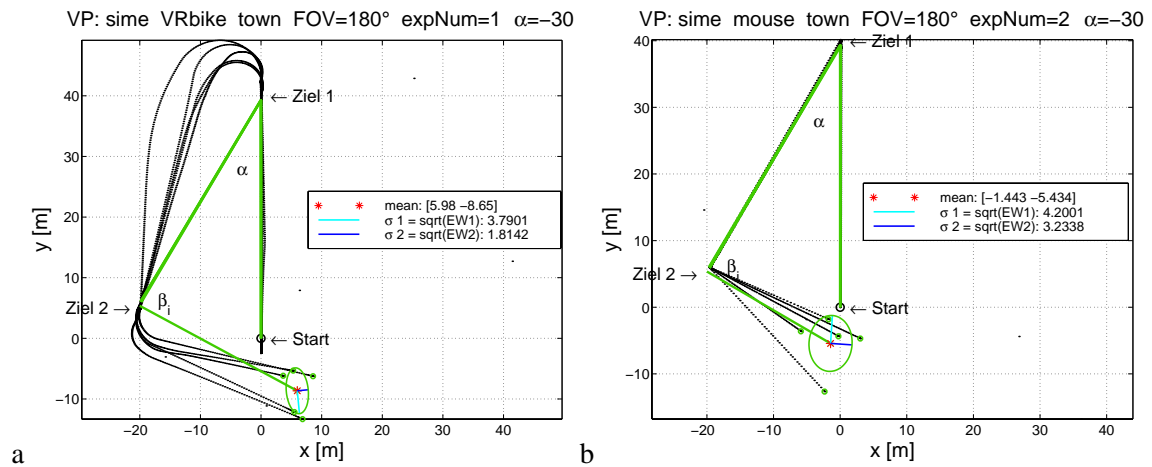


Abbildung 5.1: Beispiel für Verhaltensantworten der Versuchsperson *sime* in der Stadtlandschaft für Innenwinkel $\alpha = -30^\circ$.

Die Trajektorien sind als gepunktete Linien dargestellt, die vorgegebenen Dreiecksschenkel s_1 und s_2 und der Mittelwert für $s_{3,m}$ als durchgezogene Linien. Deutlich sichtbar sind die geschwungenen Kurven für das Fahrradbewegungsmodell (a) und die geraden Trajektorien mit Drehungen auf der Stelle für das Mausbewegungsmodell (b). Um die Endpunkte der Trajektorien sind 1σ Vertrauensellipsen gelegt, deren Zentrum durch das arithmetische Mittel der Endkoordinaten $\vec{x}_{3,m}$ definiert ist (s. S. 55). In der Legende sind die Daten der Ellipse aufgelistet: (x, y) -Koordinate des Zentrums (“mean”) sowie großer und kleiner Halbmesser der Ellipse ($\sigma 1$ bzw. $\sigma 2$).

Die Versuchsbedingungen des Blocks sind im Titel in folgender Reihenfolge enthalten: Versuchspersonenkürzel (*sime*), Bewegungsmodell (VRbike bzw. mouse), Szenerie (town), Gesichtsfeld (FOV=180°), Nummer des experimentellen Blocks (d.h. “1” steht für den ersten experimentellen Block einer bestimmten Versuchsperson, “2” für den zweiten etc. Die Numerierung begann in jedem der vier Experimente von neuem mit “1”) und Wert des Innenwinkels (α).

Eine Alternative wäre gewesen, den euklidischen Abstand des beobachteten Ausgangspunktes vom korrekten Ausgangspunkt zu verwenden.

Mit dem **Fahrradbewegungsmodell** fuhren die Versuchspersonen an den Eckpunkten \vec{x}_1 und \vec{x}_2 Kurven mit variierenden Radien (s. Abb. 5.1.a), eine Rotation ohne gleichzeitige Translation war ja auch nicht möglich. Dabei tendierten die Versuchspersonen im Verlaufe des Experiments zu immer engeren Kurven und damit auch zu geringeren Geschwindigkeiten während der Kurvenfahrt. Die engeren Kurven hatten den Vorteil, daß man sich während der Änderung der Beobachtungsrichtung nur wenig vom momentanen Standpunkt (der Dreiecksseite) fort bewegt und so die Trajektorie der Dreiecksgeometrie ähnlicher ist. Die Versuchspersonen bemühten sich also, ähnlich wie mit dem Mausinterface Translationen weitgehend von Rotationen zu separieren.

Durch dieses unterschiedliche Kurvenverhalten ergibt sich ein genereller Unterschied zwischen den beiden Bewegungsmodellen, dessen Einfluß auf die Navigationsleistung unklar ist. Um diesen Effekt zu untersuchen wurde ein Ergänzungsexperiment durchgeführt, in dem das herkömmliche Fahrradbewegungsmodell mit einem neuen, einfacher handzuhabenden verglichen wurde. Dieses erlaubte zusätzlich Drehungen auf der Stelle (s. Kap. 5.3).

Eine Darstellung der Trajektorien für alle zehn verwendeten Dreiecksgeometrien findet sich im Anhang (Abb. A.1 und A.2). Dort sind exemplarisch die Ergebnisse zweier experimenteller Blöcke der Versuchsperson *hege* abgebildet.

Analyse der Endpunkte der Trajektorien - Eliminierung von "Ausreißern"

Einige Versuchspersonen gaben an, bei ein paar Versuchen "nicht aufgepaßt" zu haben oder "aus Versehen" die Bestätigungstaste zu früh gedrückt zu haben. Um solche Ausreißer bei allen Versuchspersonen verlässlich eliminieren zu können, wurde folgendes Verfahren angewandt:

Je Versuchsperson und Bedingung³ gab es genau sechs Wiederholungen (i.e. (x, y) -Koordinaten des Endpunktes der Trajektorie \vec{x}_{3_m}). Um jeweils fünf dieser Werte wurde eine 4.5σ Vertrauensellipse⁴ gelegt, d.h. der Betrag der Halbachsen der Ellipse betrug das 4.5-fache der Standardabweichung in Richtung dieser Hauptkomponente. Lag ein Datenpunkt außerhalb dieser 4.5σ Vertrauensellipse, so wurde er eliminiert, ging also nicht in die weitere Datenanalyse ein, wobei nie mehr als einer der sechs Datenpunkte je Bedingung entfernt wurde. Der Vertrauensbereich von 4.5σ wurde so gewählt, daß die

³Versuchsbedingungen sind hier bestimmt durch den Winkel α , das Bewegungsmodell und die Szenerie.

⁴Die Verwendung einer Vertrauensellipse basiert auf der Annahme, daß die Endpunkte der Trajektorien gemäß einer zweidimensionalen Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsverteilung verteilt sind. Die Vertrauensellipse stellt dann eine Kontourlinie konstanter Wahrscheinlichkeit dar.

Um die Vertrauensellipse zu berechnen, wurde zuerst eine Transformation des Koordinatenursprungs auf den Schwerpunkt (Mittelwert) der Meßwertverteilung vorgenommen. Danach wurde eine Singulärwertzerlegung der Datenmatrix durchgeführt, um deren Eigenwerte und Eigenvektoren zu bestimmen, auf denen aufbauend die Vertrauensellipse berechnet wurde. Die Richtungen der Eigenvektoren \vec{v}_1 und \vec{v}_2 gaben dabei die Orientierung der Vertrauensellipse an, die jeweiligen Standardabweichungen σ_1 und σ_2 den Betrag der großen bzw. kleinen Halbachse der 1σ Vertrauensellipse. Die Standardabweichungen berechnen sich hierbei aus der Wurzel des entsprechenden Eigenwertes. Bei nur 6 Datenpunkten ist die Genauigkeit, mit der die Vertrauensellipse bestimmt werden kann zwar gering, jedoch für unsere Zwecke ausreichend.

als solche bekannten Ausreißer dadurch gerade erfaßt wurden. Im Mittel wurden je Versuchsperson 4 der 60 Datenpunkte eliminiert.

Systematische Fehler - Kompression der Verhaltensantwort

Im folgenden wollen wir die systematischen Fehler getrennt für die beobachtete Distanz s_m und den beobachteten Winkel β_m analysieren (vgl. Nomenklatur in Abb. 4.7). Als “**Kompression**” bezeichnen wir im folgenden die Reduktion des Umfangs des Antwortbereichs⁵ gegenüber dem Umfang des Sollwertebereiches⁶. Dies impliziert eine Vermeidung “extremer” Antworten und eine Regressionsgerade (wie in Abb. 5.2 definiert), deren Steigung betragsmäßig kleiner als “1” ist.

In Abbildung 5.2 und 5.3 sind exemplarisch die Verhaltensantworten der Versuchsperson *sime* für einen experimentellen Block dargestellt. In Abbildung 5.2 sind die beobachteten Längen s_m über ihren korrekten Werten s_{3_s} aufgetragen, in Abbildung 5.3 dasselbe für die Winkelantworten. Eine vollständige Auflistung der Ergebnisse des Hauptexperiments findet sich im Anhang A.1.

Distanzen

In Abbildung 5.2 zeigt sich eine deutliche Tendenz zu mittleren Distanzen: Für relativ kurze Sollrückweglängen s_{3_s} ist die Versuchsperson zu weit gefahren, für große Distanzen nicht weit genug. “Kleine” zurückgelegte Distanzen werden überschätzt, “große” Distanzen unterschätzt, es zeigt sich also eine Kompression der Verhaltensantwort bezüglich der Rückweglänge. Diese Kompression der Rückweglänge ist typisch, wie sich an Abbildung 5.4 ablesen läßt. Dort sind die über alle Versuchspersonen und Blöcke gemittelten Verhaltensantworten abgebildet.

Durch die Distanzantworten ist eine Regressionsgerade gelegt. Komplexere Fitfunktionen sind nicht nötig, wie man an dem guten Fit durch die Gerade erkennen kann. Die Regressionsgerade ist über eine gewichtete Regression berechnet. Dadurch werden Werte mit geringer Standardabweichung σ stärker gewichtet (s. Regressionsgerade für Linksdrehungen in Abb. 5.3).

Die mittlere Längenkompression (s. Abb. 5.4, oben), quantifiziert durch die Steigung a der Regressionsgeraden, beträgt $a = 0.6922 \pm 0.0006$ und unterscheidet sich somit signifikant vom korrekten Wert ($a = 1$).

Das bedeutet, daß die Versuchspersonen im Mittel für “kurze” korrekte Rückweglängen s_s ($\beta \geq 60^\circ$) zu weit fahren, für “große” ($\beta \leq 30^\circ$) nicht weit genug. Für die mittlere Distanz ($\beta = 45^\circ$) ist die Distanzantwort korrekt. Über die verschiedenen Dreiecksgeometrien bzw. korrekten Distanzen gemittelt ergibt sich ein Distanzfehler von $s_m - s_s = 2.93 \text{ m} \pm 1.11 \text{ m}$, d.h. die Versuchspersonen fahren im Mittel lediglich 3 m bzw. 5.5% zu weit auf einer durchschnittlichen Gesamtstrecke von 53 m.

⁵Meßwerteintervalls oder Bildmenge der Abbildung der Soll-Werte auf die beobachteten Werte

⁶korrekte Werte oder Urbildmenge

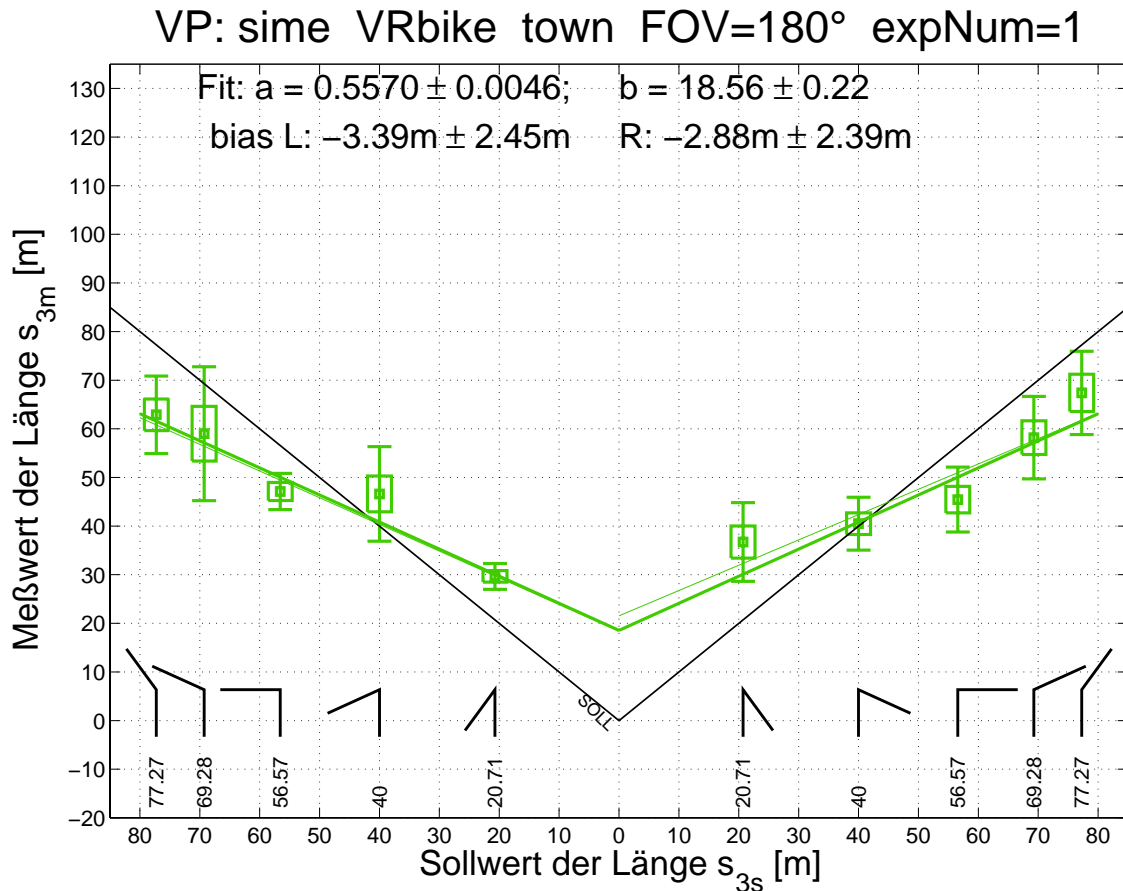


Abbildung 5.2: Verhaltensantwort der Versuchsperson *sime* für einen experimentellen Block mit dem Fahrradbewegungsmodell in der Stadtlandschaft: Zurückgelegte Strecke s_{3m} (Luftlinie) zur Vervollständigung des Dreiecks, aufgetragen über der korrekten Länge des dritten Schenkels s_{3s} (vgl. Nomenklatur in Abb. 4.7).

Dargestellt sind die Mittelwerte der zehn Dreiecksgeometrien, links für Linksdrehungen, rechts für Rechtsdrehungen. Die Dreiecksgeometrie (Winkel α) ist durch die kleinen Winkel unten in den Graphiken symbolisiert. Die Boxen um den Mittelwert geben hier (wie auch in allen anderen Graphiken) den Standardfehler des Mittelwerts an (standard error of the mean), also ein Maß für die Verlässlichkeit des Mittelwertes. Die Whisker (Schnurrbarthaare) stellen die Standardabweichung dar. Durch die Datenpunkte wurden Regressionsgeraden gelegt, einerseits getrennt für Drehungen nach links und rechts (dünne farbige Gerade), andererseits für Links- und Rechtsdrehungen gemeinsam (dicke farbige Geraden). Die Regressionsparameter (a, b) der gemeinsamen Regressionsgeraden $s_{3m}(s_{3s}; a, b) = a \cdot s_{3s} + b$ sind oben in der Graphik angegeben, je mit ihren Standardfehlern. Darunter ist die gemittelte Überschätzung bzw. Unterschätzung der Distanzen (positive bzw. negative Werte) aufgetragen (“bias”), links für Linksdrehungen, rechts für Rechtsdrehungen. Die korrekte Verhaltensantwort ist als schwarze Diagonale ($a = 1, b = 0$) eingezeichnet (“SOLL”).

Die Versuchsbedingungen des Blocks sind im Titel in folgender Reihenfolge enthalten: Versuchspersonenkürzel (VP: *sime*), Bewegungsmodell (VR Bike), Szenerie (town), Gesichtsfeld (FOV=180°) und Nummer des experimentellen Blocks (expNum), d.h. “1” steht für den ersten experimentellen Block einer bestimmten Versuchsperson in einem Experiment, “2” für den zweiten etc.

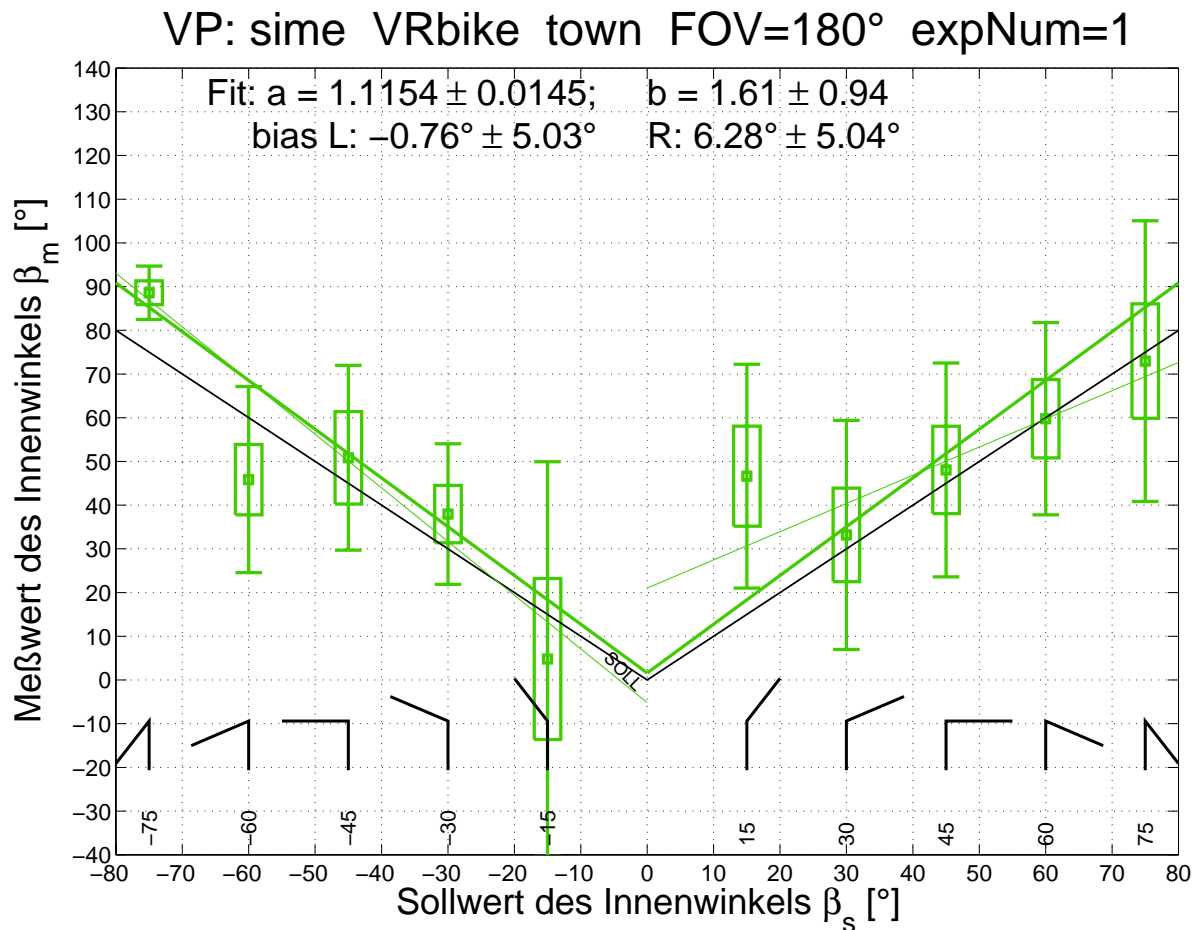


Abbildung 5.3: Verhaltensantwort der Versuchsperson *sime* für einen experimentellen Block mit dem Fahrradbewegungsmodell in der Stadtlandschaft:

Eingeschlagener Winkel β_m zur Vervollständigung des Dreiecks, aufgetragen über dem korrekten Winkel β_s zwischen zweitem Schenkel s_2 und drittem Schenkel s_{3_s} . (Vgl. Legende Abb. 5.2)

Der Drehwinkel, i.e. die von der Versuchsperson vorgenommene Richtungsänderung, ergibt sich zu $\overline{\beta_m} = 180^\circ - |\beta_m|$. Um die Verhaltensantworten für Drehungen nach links und rechts besser miteinander vergleichen zu können, ist auf der Ordinate der Meßwert des Innenwinkels β_m im Betrag $|\beta_m|$ dargestellt. Es zeigt sich ein geringfügiger Unterschied zwischen Links- und Rechtsdrehungen. Vgl. Legende in Abb. 5.2

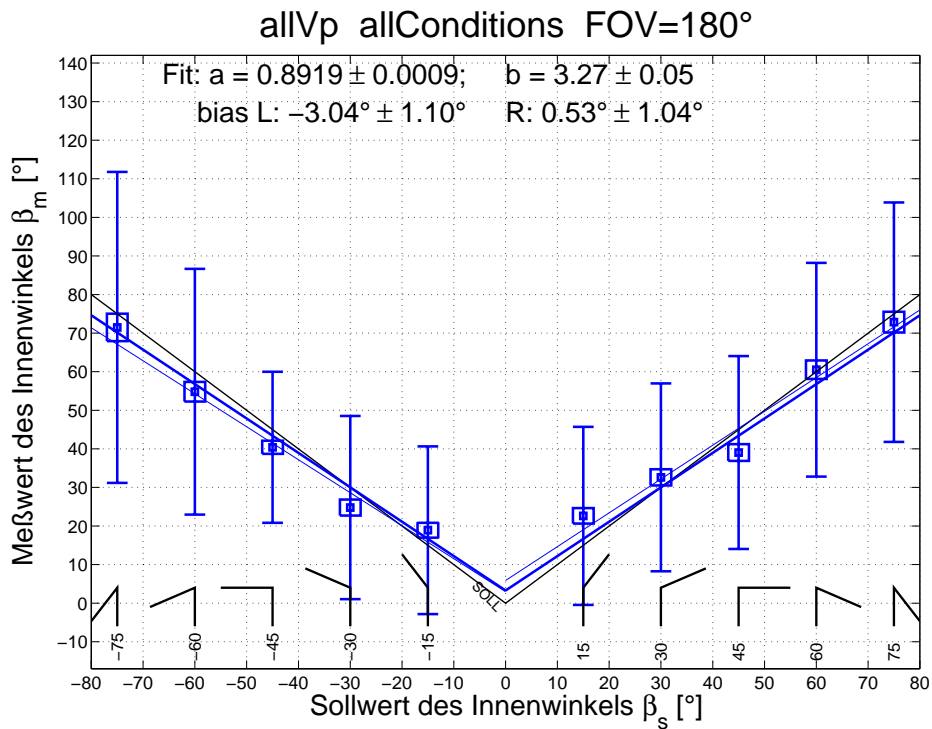
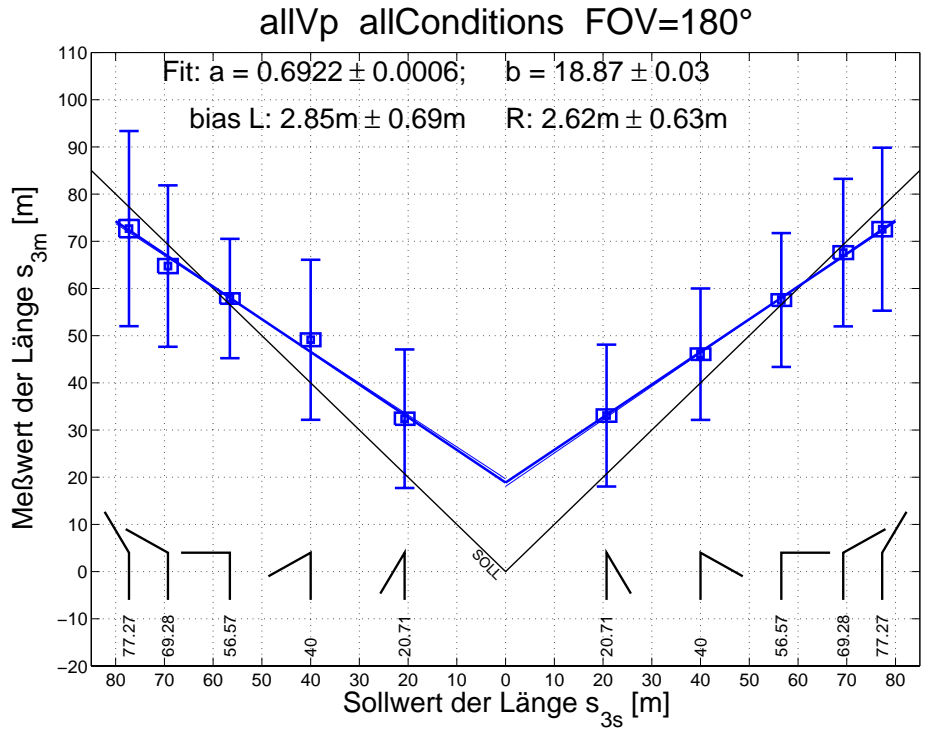


Abbildung 5.4: Verhaltensantworten im Hauptexperiment, gemittelt über alle Versuchspersonen und experimentelle Blöcke: Vergleich von beobachtetem und korrektem Wert für Winkel β (unten) und Längen s_3 (oben). Es zeigt sich eine deutliche Kompression der Längenantwort, die Kompression der Winkelantwort ist hingegen gering.

Die mittlere Längenabweichung (signed error) von 5.5% ist wesentlich geringer als die von Loomis et al. (1993) beobachtete Abweichung von 25.4%. Der absolute Distanzfehler (absolute error) ist bei Loomis et al. (1993) mit 34.3% doppelt so hoch wie in unserem Experiment (17.7%).

Die hier gefundene Längenkompression bestätigt in etwa die Ergebnisse der Untersuchungen von Loomis et al. (1993) und Péruch et al. (1997), die bei Dreiecksvervollständigungsexperimenten ebenfalls eine Regression zum Mittelwert fanden. Die genauen Werte der Längen- und Winkelkompression sind dort jedoch nicht aufgeführt und konnten nur anhand der Graphiken abgeschätzt werden.

Winkel

Für die Winkelantwort zeigte sich eine wesentlich geringere Kompression als für die Distanzantwort (s. Abb. 5.4, unten). Die mittlere Winkelkompression, quantifiziert über die Steigung der Regressionsgeraden $\beta_m(\beta_s; a, b) = a \cdot \beta_s + b$, beträgt $a = 0.8919 \pm 0.0009$. Der über die Dreiecksgeometrien gemittelt Winkelfehler⁷ beträgt $\beta_s - \beta_m = -0.36^\circ \pm 1.45^\circ$ und ist nicht signifikant von Null verschieden, besitzt jedoch eine recht hohe Standardabweichung von 14.5°.

Der vorzeichenbehaftete und absolute Winkelfehler (signed and absolute error) in der Studie von Loomis et al. (1993) betrug -5.7° bzw. 23.3° . Während der absolute Winkelfehler mit dem von uns beobachteten vergleichbar ist (19.6°), zeigt sich in unseren Ergebnissen ein wesentlich geringerer vorzeichenbehafteter Fehler von nur -0.36° . In den Studien von Péruch et al. (1997) sind die Längen- und Winkelabweichungen nicht separat aufgeführt. Den Graphiken nach zu urteilen sind sie jedoch wesentlich größer als die von Loomis et al. (1993) beobachteten, liegen also ebenfalls wesentlich über den von uns beobachteten mittleren Fehlern.

Kompression des Antwortverhaltens, nach Versuchspersonen aufgeschlüsselt

In Abbildung 5.5 sind die Steigungen der Regressionsgeraden (vgl. Abb. 5.2) als Maß für die Längen- bzw Winkelkompression aufgetragen, aufgeschlüsselt nach Versuchsperson und Versuchsbedingung. Deutlich sichtbar ist die Kompression der Verhaltensantwort bezüglich der Rückweglänge s_m in 19 von 24 experimentellen Blöcken, die Versuchspersonen tendierten also in Richtung des Mittelwertes. Nur in drei Fällen trat eine Längendekompression auf (*felo1*, *felo2* und *sthe2*).

Der Standardfehler des Mittelwerts der Steigung der Regressionsgeraden ($\text{stdError}(a)$) ist für alle Versuchspersonen recht gering, was darauf hindeutet, daß die Daten gut durch eine Gerade approximiert werden, also keine komplexeren Terme in der Fitfunktion nötig sind.

Wie in Abbildung 5.5 zu sehen, zeigt sich kein klarer Effekt der Versuchsbedingungen auf die Distanz- bzw. Winkelkompression. Es sind jedoch klare Unterschiede zwischen den Versuchspersonen zu erkennen. So zeigte die Versuchsperson *chfl* Distanz- und Winkelantworten, die weitgehend unabhängig

⁷Sofern wir den Fehler nicht weiter spezifizieren, beziehen wir uns stets auf den vorzeichenbehafteten Fehler (signed error).

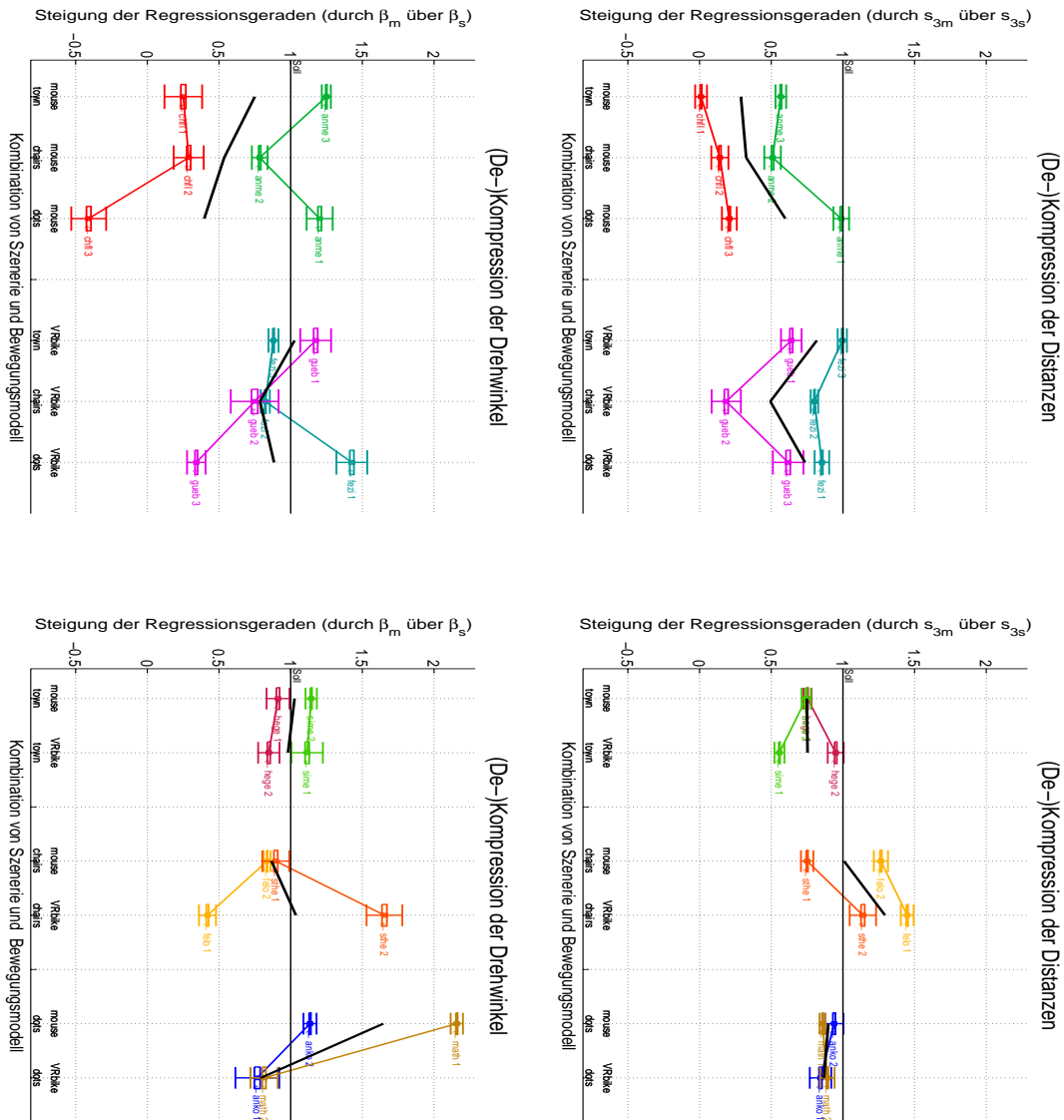


Abbildung 5.5: (De-)Kompression der Winkel und Längen in der Verhaltensantwort der Versuchspersonen.

Dargestellt ist die Steigung der Regressionsgeraden (vgl. Abb. 5.2, 5.3 und Kap. A.1) für die verschiedenen Versuchsbedingungen und Versuchspersonen. Eine Steigung < 1 bedeutet eine Verschiebung der Verhaltensantwort hin zum Mittelwert, also eine “Kompression”. Links die (De-)Kompression der Winkel in der Abbildung $\beta_s \rightarrow \beta_m(\beta_s)$, quantifiziert durch die Steigung der Regressionsgeraden $\beta_m(\beta_s; a, b) = a \cdot \beta_s + b$ (vgl. Abb. 5.3). Rechts die (De-)Kompression der Längen $s_{3s} \rightarrow s_{3m}(s_{3s})$. In den oben dargestellten Graphiken wurde die Szenerie variiert (“Szenerie-Gruppe”), unten das Bewegungsmodell (“Bewegungsmodell-Gruppe”). Neben dem jeweiligen Mittelwert stehen das Versuchspersonenkürzel und die Nummer des Experiments. In einer Graphik sind jeweils die Verhaltensantworten zweier Versuchspersonen gemeinsam dargestellt, die die Versuchsbedingungen in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen haben (“experimentelle Gruppe”). Die Mittelwerte einer experimentellen Gruppe sind als schwarze Linie aufgetragen. Jeder Versuchsperson ist eine eindeutige Farbe zugeordnet, die auch in weiteren Graphiken dieses Experiments beibehalten wird.

von den korrekten Werten waren ($a \approx 0$). Sie drehte sich für den Rückweg also stets um etwa denselben Betrag, ebenso war die Rückweglänge weitgehend konstant, unabhängig vom korrekten Wert (s. Anhang A.1, Abb. A.10). Anders gesagt war ihre Verhaltensantwort immer in etwa gleich, unabhängig vom Stimulus.

Analyse der Mittelwerte

Wir wollen uns nun der Analyse der über einen experimentellen Block gemittelten Distanz- und Winkelfehler zuwenden. Dazu haben wir die Abweichung vom korrekten Wert in Distanz- und Winkelantwort in Abbildung 5.6 graphisch dargestellt, um Effekte direkt ablesen zu können.

In Abbildung 5.6 läßt sich für die Szenerie-Gruppe eine Tendenz ablesen, in der Stadtumgebung weniger weit zu fahren als in der Stuhllandschaft und in der Punktelwolke. Dies könnte daran liegen, daß es nur in der Stadt eine sichtbare Begrenzung durch die endliche Ausdehnung des Platzes gab. Hingegen hatten die Stuhl- und Punktelandschaft keine sichtbare Begrenzung, erschienen also unendlich ausgedehnt. Zugleich zeigt sich eine Tendenz, in der Stadtumgebung weniger weit zu drehen als in der Punktelwolke.

Für die Bewegungsmodell-Gruppe ist in Abbildung 5.6 die Tendenz sichtbar, mit dem Mausbewegungsmodell weniger weit zu drehen als mit dem Fahrradbewegungsmodell.

Um die Signifikanz dieser Effekte zu untersuchen führten wir eine 3-faktorielle Varianzanalyse (*MANOVA*) durch (2 Bewegungsmodelle \times 3 Szenerien \times 10 Dreiecksgeometrien bzw. Winkel α), getrennt für die Szenerie-Gruppe und Bewegungsmodell-Gruppe (s. Tab. 4.1). Abhängige Variablen (Meßgrößen) waren Winkel- bzw. Distanzfehler (signed error). Wir interessierten uns hier für den Einfluß der Szenerie bzw. des Bewegungsmodells auf den Homingfehler (Szenerie-Gruppe bzw. Bewegungsmodell-Gruppe). Die Ergebnisse der *MANOVA* sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Szenerie-Gruppe

Für die Szenerie-Gruppe zeigte sich mit dem Distanzfehler $s_{3_m} - s_{3_s}$ als abhängiger Variable ein Haupteffekt für den Faktor Dreiecksgeometrie (i.e., den Winkel α), $F[9,18] = 5.04$; $p = 0.002$, den wir bereits als Kompression der Verhaltensantwort identifiziert hatten (vgl. Abb. 5.4 und 5.5).

Der Einfluß der Szenerie auf den Distanzfehler war erkennbar, jedoch nur auf einem 6.5% Level signifikant ($F[2,4] = 5.81$; $p = 0.065$). Das heißt die Annahme, daß sich die Distanzfehler in den Szenerien unterscheiden, hat einen Irrtumswahrscheinlichkeit von 6.5%.

Die Mittelwerte für den Distanzfehler $s_{3_m} - s_{3_s}$ betragen $4.1 m \pm 2.2 m$ für die Punktelwolke, $5.3 m \pm 2.6 m$ für die Stuhllandschaft und $-3.5 m \pm 2.4 m$ für die Stadt. In der Stadtumgebung wurde also nicht weit genug gefahren, in den beiden anderen Umgebungen zu weit.

Die signifikante drei-weg Interaktion für den Distanzfehler (BewMo \leftrightarrow VU \leftrightarrow α , $F[18,36] = 1.996$, $p = 0.048$) wollen wir nicht weiter untersuchen, da der Faktor Bewegungsmodell nicht innerhalb der

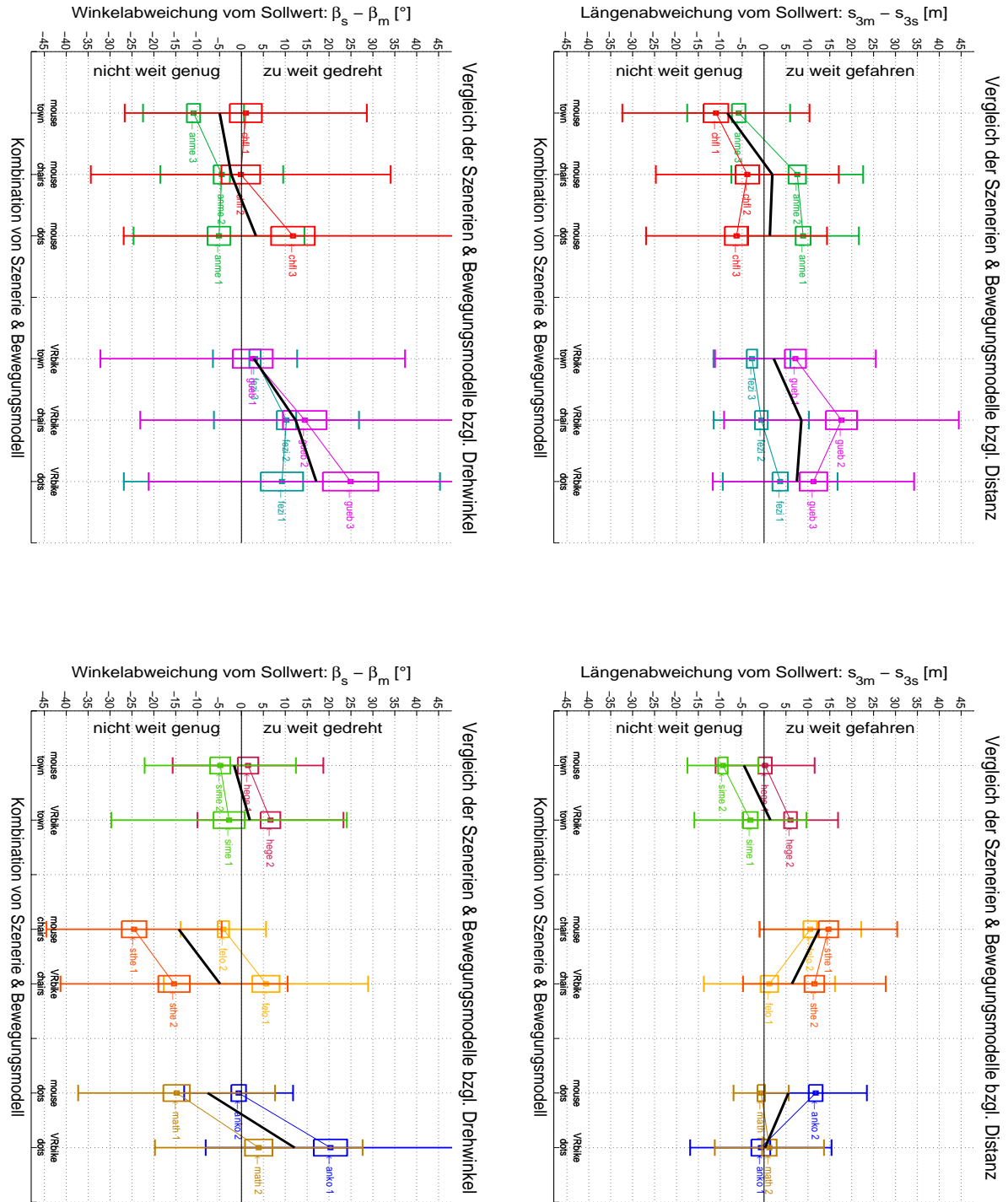


Abbildung 5.6: Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen bezüglich Winkelabweichung (links) und Längenabweichung vom Sollwert (rechts), oben für die Szenerie-Gruppe, unten für die Bewegungsmodell-Gruppe. Die Box stellt den Standardfehler des Mittelwertes dar, die “Whisker” die Standardabweichung (1σ).

Szenerie-Gruppe							
Kontrollparameter (unabh. Var.)		Meßgröße (abh. Var.)					
Faktor	Level/Typ	$\beta_s - \beta_m$			$s_{3_m} - s_{3_s}$		
Bewegungsmodell	2 between	F[1,2]= 3.567	p=0.200	n.s.	F[1,2]=0.949	p=0.433	n.s.
Szenerie (VU)	3 within	F[2,4]= 4.442	p=0.096	n.s.	F[2,4]=5.817	p=0.065	p=6.5%
BewMo \leftrightarrow VU	Interaktion	F[2,4]=0.475	p=0.653	n.s.	F[2,4]=0.414	p=0.687	n.s.
α	10 within	F[9,18]=0.814	p=0.610	n.s.	F[9,18]=5.040	p=0.002	p \leq 0.5%
BewMo \leftrightarrow α	Interaktion	F[9,18]=0.722	p=0.684	n.s.	F[9,18]=0.477	p=0.871	n.s.
VU \leftrightarrow α	Interaktion	F[18,36]=0.742	p=0.747	n.s.	F[18,36]=1.948	p=0.044	p \leq 5%
BewMo \leftrightarrow VU \leftrightarrow α	Interaktion	F[18,36]=0.692	p=0.796	n.s.	F[18,36]=1.996	p=0.048	p \leq 5%

Bewegungsmodell-Gruppe							
Kontrollparameter (unabh. Var.)		Meßgröße (abh. Var.)					
Faktor	Level/Typ	$\beta_s - \beta_m$			$s_{3_m} - s_{3_s}$		
Bewegungsmodell	2 within	F[1,3]=300.368	p \leq 0.0005%		F[1,3]=0.435	p=0.557	n.s.
Szenerie (VU)	3 between	F[2,3]=0.681	p=0.570	n.s.	F[2,3]=2.362	p=0.242	n.s.
BewMo \leftrightarrow VU	Interaktion	F[2,3]=67.779	p=0.003	p \leq 0.05%	F[2,3]=2.361	p=0.242	n.s.
α	10 within	F[9,27]=1.065	p=0.419	n.s.	F[9,27]=1.361	p=0.254	n.s.
BewMo \leftrightarrow α	Interaktion	F[9,27]=0.465	p=0.885	n.s.	F[9,27]=1.072	p=0.414	n.s.
VU \leftrightarrow α	Interaktion	F[18,27]=0.448	p=0.960	n.s.	F[18,27]=0.836	p=0.649	n.s.
BewMo \leftrightarrow VU \leftrightarrow α	Interaktion	F[18,27]=1.235	p=0.303	n.s.	F[18,27]=1.384	p=0.217	n.s.

Tabelle 5.1: Multiple Varianzanalyse (MANOVA) für die Szenerie-Gruppe (oben) und die Bewegungsmodell-Gruppe (unten), je für die abhängigen Variablen Winkelabweichung $\beta_s - \beta_m$ und Längenabweichung vom korrekten Wert $s_{3_m} - s_{3_s}$.

Die Faktoren (unabhängigen Variablen) sind 2 Bewegungsmodelle (BewMo) \times 3 Szenerien (VU) \times 10 Dreiecksgeometrien (α). Von Interesse war insbesondere der Einfluß der Szenerie (oben) bzw. des Bewegungsmodells (unten) auf die Homingleistung. "n.s." bedeutet "nicht signifikant" auf einem 5% Level, d.h. die Wahrscheinlichkeit, daß ein systematischer Unterschied für den entsprechenden Faktor existiert, ist $\leq 5\%$.

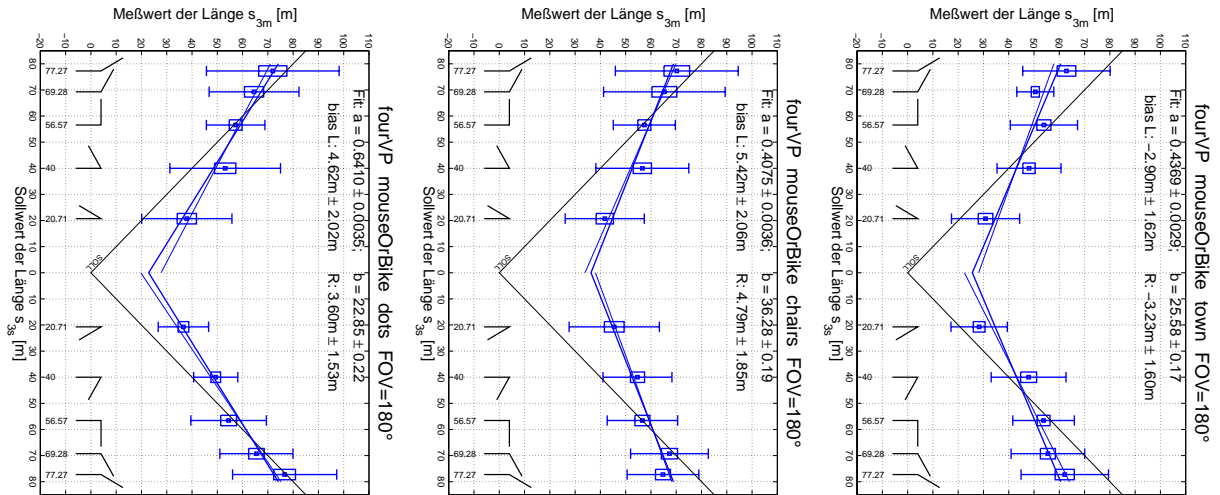


Abbildung 5.7: Graphische Darstellung der Längenkompression für die verschiedenen Szenarien. Dies ermöglicht die graphische Analyse der Interaktion zwischen den Faktoren Szenerie und Dreiecksgeometrien bezüglich der Distanzantwort in der Szenerie-Gruppe. In der Punktwolke (linke Graphik) zeigt sich eine wesentlich geringere Längenkompression als in der Stuhl- und Stadtlandschaft (Mitte bzw. rechts).

Versuchspersonen variiert wurde und wir hier nicht an den Unterschieden zwischen Versuchspersonen interessiert waren.

Um die signifikante Interaktion zwischen Szenerie und Dreiecksgeometrien ($VU \leftrightarrow \alpha$, $F[9,18] = 1.948$, $p = 0.044$) bezüglich des Distanzfehlers zu analysieren, haben wir die Ergebnisse in Abbildung 5.7 graphisch gegenübergestellt. Man kann daran ablesen, daß die Steigung a_m der Regressionsgeraden für die Punktwolke mit $a = 0.6410 \pm 0.0035$ näher an dem Korrekten Wert $a_s = 1$ liegt als für die Stuhl- oder Stadtlandschaft ($a = 0.4075 \pm 0.0036$ bzw. $a = 0.4369 \pm 0.0029$). Das bedeutet, daß die Längenkompression in der Punktwolke wesentlich geringer ist als in den beiden realistischeren Umgebungen. Dieses Ergebnis erstaunte uns, da wir vermutet hatten, daß die fehlenden Landmarken in der abstrakten Punktwolke eher zu schlechteren Distanzschätzungen führen würden. Andererseits ist der optische Fluß in der Punktwolke wesentlich höher, insbesondere im oberen Gesichtsfeld. Wir vermuten, daß dieser hohe optische Fluß im oberen Gesichtsfeld für die korrekte Distanzwahrnehmung in unserem Versuchsaufbau eine wichtigere Rolle spielt als die Landmarkeninformation.

Bewegungsmodell-Gruppe

Das Bewegungsmodell zeigte keinen signifikanten Einfluß auf den Distanzfehler ($F[1,3] = 0.44$; $p = 0.56$), der Einfluß auf den Winkelfehler war jedoch hoch signifikant: $F[1,3] = 300.4$; $p \leq 0.0005\%$. Die Mittelwerte für den Distanzfehler $s_{3m} - s_{3s}$ betragen $2.73 m \pm 1.26 m$ für das VR Bike und $4.45 m \pm 1.48 m$ für das Mausbewegungsmodell. Im Mittel führten das VR Bike also zu etwas besseren Distanzwerten, bei beiden Bewegungsmodellen wurde im Mittel zu weit gefahren. Die Mittelwerte für den Winkelfehler $\beta_s - \beta_m$ beliefen sich auf $2.72^\circ \pm 2.26^\circ$ für das VR Bike und $-7.99^\circ \pm 1.90^\circ$

für das Mausbewegungsmodell. Während also die Drehwinkel für das Fahrradbewegungsmodell nur geringfügig über dem korrekten Wert lagen drehten die Versuchspersonen mit dem Mausbewegungsmodell im Mittel um 8° zu wenig.

Die Interaktion zwischen Bewegungsmodell und Szenerie, die bezüglich des Winkelfehlers ebenfalls hoch signifikant war, (BewMo \leftrightarrow VU, $F[2,3]=67.8$, $p=0.003$), läßt sich anhand von Abbildung 5.6 interpretieren: Mit dem Mausbewegungsmodell wurde generell weniger weit gedreht als mit dem Fahrrad. In der Stadtlandschaft war dieser Einfluß des Bewegungsmodells wesentlich stärker als in der Punktwolke; die Stuhllandschaft nahm eine Zwischenstellung ein.

Variabilität der Bewegungsentscheidungen

Um Einflüsse der Versuchsbedingungen auf die Sicherheit bzw. Verlässlichkeit der Bewegungsentscheidungen zu erkennen, analysierten wir deren “**Variabilität**”. Mit “Variabilität” bezeichnen wir hier die Schwankung der Verhaltensantworten um ihren jeweiligen Mittelwert: Für jeden Experimentellen Block und jede der $M = 10$ Dreiecksgeometrien ($i = 1, \dots, M$) existierten $N_i = 6$ Meßwerte⁸ ($j = 1, \dots, 6$) für den Winkel β_m bzw. die Distanz s_{3m} . Für jeden Meßwert x_{ij} (x steht für β_m bzw. s_{3m}) definieren wir einen *relativen* Meßwert \widetilde{x}_{ij} als die Abweichung des Meßwertes x_{ij} vom Mittelwert über alle Meßwerte derselben Dreiecksgeometrie $\overline{x}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}$, also

$$\widetilde{x}_{ij} := x_{ij} - \overline{x}_i = x_{ij} - \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij}$$

Als “**Variabilität**” $\sigma(\widetilde{x}_{ij})$ definieren wir nun die Standardabweichung des relativen Meßwertes

$$\sigma(\widetilde{x}_{ij}) := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} (\widetilde{x}_{ij} - \overline{\widetilde{x}_{ij}})^2}{\left(\sum_{i=1}^M N_i\right) - 1}}$$

wobei $\overline{\widetilde{x}_{ij}}$ den mittleren relativen Meßwert bezeichnet:

$$\overline{\widetilde{x}_{ij}} := \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \widetilde{x}_{ij}}{\sum_{i=1}^M N_i}$$

Diese Variabilität haben wir in Abbildung 5.8 graphisch dargestellt. Es lassen sich zwei Tendenzen erkennen:

Für die Szenerie-Gruppe ist die Variabilität der Distanz- und Winkelantwort in der Stadtumgebung am geringsten und in der Punktwolke am höchsten. Die Versuchspersonen sind also im Mittel in

⁸Wurde einer der 6 Meßwert als “Ausreißer” eliminiert, so reduzierte sich die Zahl der Meßwerte entsprechend auf $N_i = 5$.

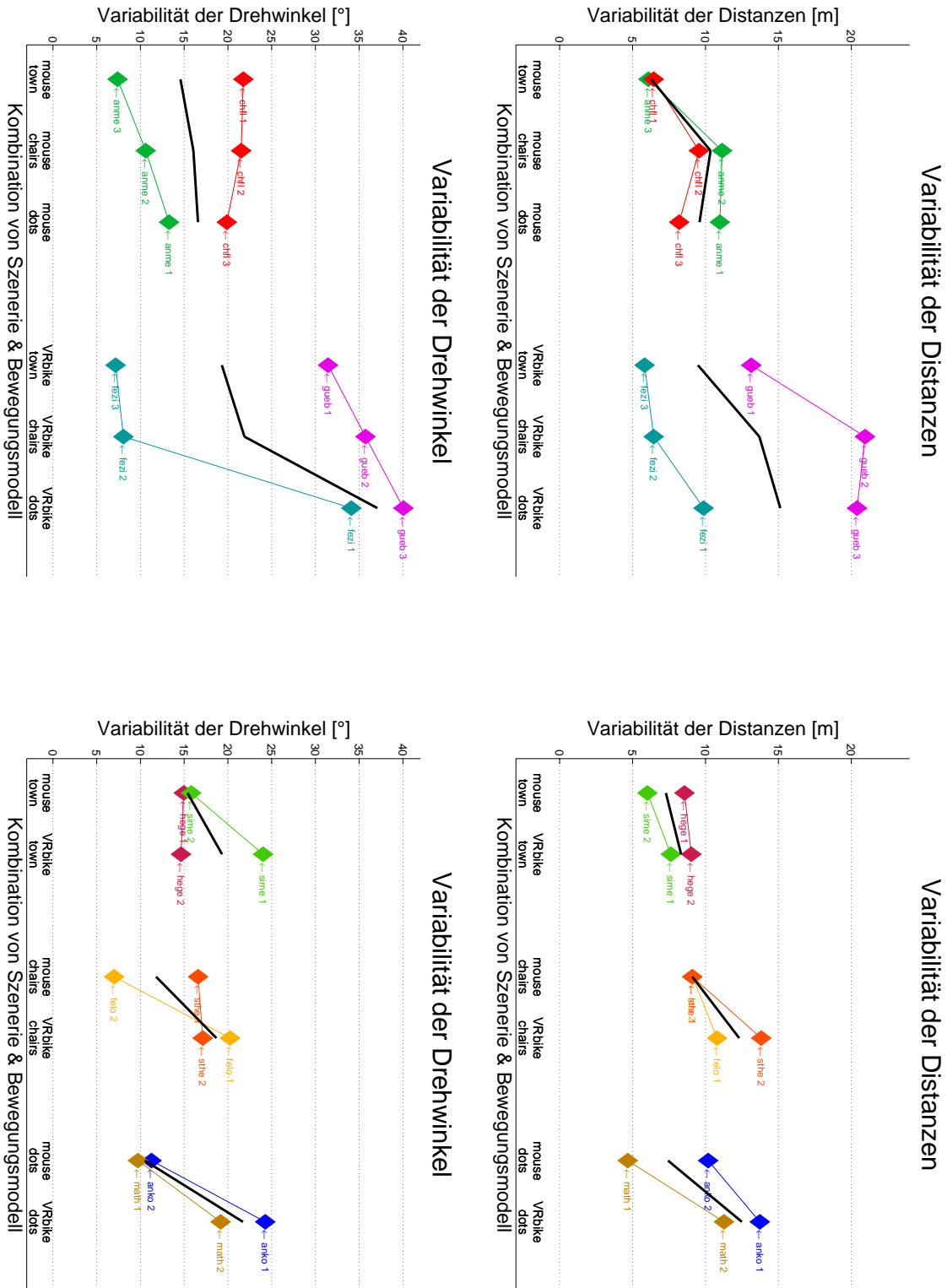


Abbildung 5.8: Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen bezüglich der Variabilität in Winkel (links) und Länge (rechts). Die Variabilität kann als Maß für die Sicherheit der Versuchspersonen in ihrem Antwortverhalten verstanden werden.

ihren Bewegungsentscheidungen in der abstrakteren Punktwolke unsicherer als in der realistischeren Stadtlandschaft. *fezi* zeigt in seinem ersten experimentellen Block bezüglich der Drehwinkel eine auffallend hohe Varianz, verglichen mit den beiden nachfolgenden Blöcken. Als wir ihn im Anschluß an den letzten Block danach befragten bestätigte er, daß er im ersten Versuch unsicher gewesen sei und anfangs versucht habe, die Winkel im Kopf auszurechnen. Dies erklärte auch die ungewöhnlich lange Versuchsdauer seines ersten Blocks von zwei Stunden.

In der Bewegungsmodell-Gruppe zeigt sich für das Fahrradbewegungsmodell eine größere Variabilität, sowohl für Distanz- als auch Winkelantworten. Wir vermuteten, daß diese größere Unsicherheit an den Unterschieden im Drehverhalten der beiden Bewegungsmodelle liegen könnte: Während mit dem Mausbewegungsmodell auf der Stelle gedreht werden konnte und auch wurde, war dies mit dem Fahrradbewegungsmodell nicht möglich - der minimale Kurvenradius mit dem Fahrradmodell betrug etwa 1.5 m. Um den Einfluß dieser Kopplung von Rotation an Translation systematisch zu untersuchen entwickelten wir in Experiment 3 ein neues Fahrradmodell, bei dem sich Rotation und Translation entkoppeln ließen. Über die Ergebnisse werden wir in Kapitel 5.3 berichten.

5.2 Experiment 2 - Kontrollexperiment ohne Szenenwechsel

5.2.1 Motivation und Hypothesen

Nach Beendigung des Hauptexperimentes blieb unter anderem die folgende Frage offen, der wir uns nun zuwenden wollen: Wie groß war der Einfluß des Szenenwechsel auf das Heimfindeverhalten? Der Szenenwechsel stellte eine neuartige Untersuchungsmethode in der menschlichen Navigationsforschung dar um “homing by scene matching” auszuschließen, ist also noch wenig untersucht. Da wir einen Vergleichsmaßstab für das Hauptexperiment benötigten, führten wir dasselbe Experiment nochmals in der Stadtumgebung durch, ohne diesmal die Versuchspersonen vor dem Rückweg auf den zweiten Platz zu “teleportieren”. Versuchspersonen konnten nun also neben der Pfadintegration auch Piloting benutzen, ähnlich wie in einer realen Umgebung.

Die Fragestellung dieses Experiments war somit, wie gut in unserer virtuellen Stadtlandschaft Homing überhaupt möglich sei, um daraus den Einfluß des Szenenwechsels im Hauptexperiment erschließen zu können. Unsere Hypothese war, daß ohne den Szenenwechsel Homing mit hoher Genauigkeit und ohne systematischen Fehler möglich sein sollte. Wir vermuteten weiter, daß Piloting der dominierende Navigationsmechanismus sein würde und daß Pfadintegration dadurch unwichtig werden würde.

5.2.2 Methoden

Das Experiment fand ausschließlich auf Platz A der virtuellen Stadt statt. In der Dunkelphase nach Erreichen der zweiten Dreiecksecke \vec{x}_2 fand also kein Szenenwechsel statt. Das Experiment bestand aus sechs experimentellen Blöcken, je drei für die Bewegungsmodelle Maus und VR Bike (s. Tab. 5.2). Die Versuchspersonen *hege* und *sime* führten das Experiment mit beiden Bewegungsmodellen durch, *anme* und *fezi* nur mit je einem. Alle vier Versuchspersonen waren mit der Stadtumgebung bereits vertraut und hatten im Hauptexperiment bereits dieselben Blöcke *mit* Szenenwechsel durchlaufen, so daß auf eine Trainingsphase verzichtet werden konnte. Abgesehen vom fehlenden Szenenwechsel waren die experimentellen Blöcke mit denen des Hauptexperimentes identisch.

VP	1. Block	2. Block
<i>anme</i>	Maus	–
<i>fezi</i>	VR Bike	–
<i>hege</i>	Maus	VR Bike
<i>sime</i>	VR Bike	Maus

Tabelle 5.2: Übersicht über das experimentelle Design des 2. Experiments: Stadtlandschaft ohne Szenenwechsel.

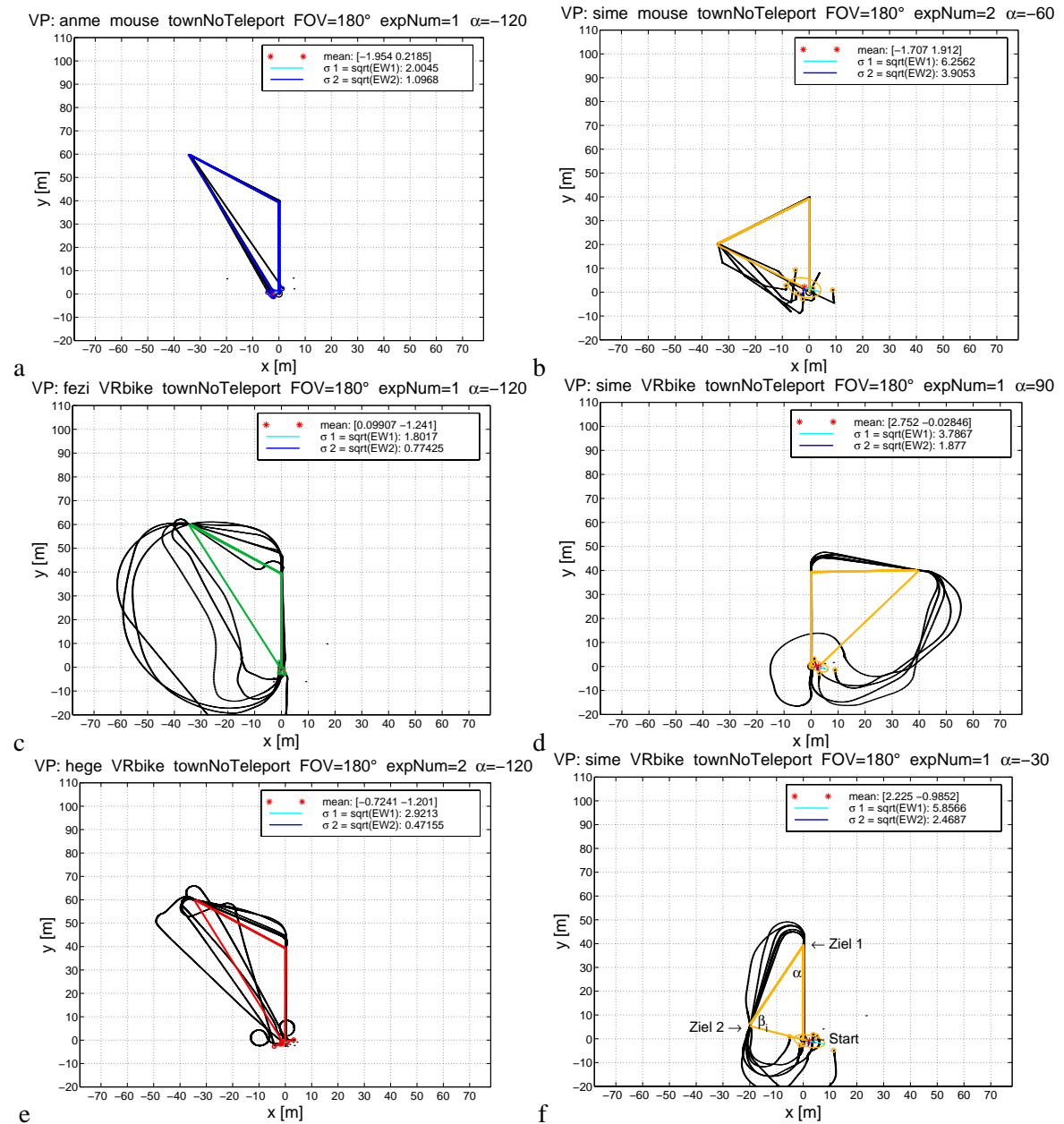


Abbildung 5.9: Beispiele für Trajektorien verschiedener Versuchspersonen in der Stadt ohne Szenenwechsel. Auffallend sind die guten Homingleistungen und die verschiedenartigen Trajektorien. Letztere deuten darauf hin, daß Piloting die dominante Homingstrategie war.

5.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Um einen ersten Eindruck über die Ergebnisse zu bekommen wollen wir uns in Abbildung 5.9 einige typische Trajektorien anschauen. Es fallen dabei zweierlei Effekte auf. Einerseits sind die Homingleistungen generell sehr gut, verglichen mit den Ergebnissen *mit* Szenenwechsel im Hauptexperiment. Andererseits fällt die Vielzahl verschiedenartiger, gerader und geschwungener Trajektorien auf - wohingegen die Trajektorien im Hauptexperiment mit Szenenwechsel durchweg gradlinig und “zielstrebig” waren, vergleiche dazu Abb. A.1 und A.2. Wir interpretieren die verschiedenartigen Trajektorien in Kapitel 5.2.3 zusammen mit den verwendeten Strategien.

Die Homingleistung war generell sehr gut, mit vernachlässigbaren Differenzen zwischen den Versuchspersonen und Bewegungsmodellen. Deshalb verzichteten wir hier auf die Darstellung der Einzelergebnisse, und stellen in Abbildung 5.10 lediglich die über alle Versuchspersonen und -bedingungen gemittelten Ergebnisse dar. Die geringen Unterschiede zwischen den Bedingungen zeigen sich auch an der geringen Standardabweichung der gemittelten Verhaltensantworten. Im Mittel stimmen die Ergebnisse sehr genau mit dem korrekten Werten überein; lediglich für $\beta = \pm 75^\circ$ wurde nicht weit genug gedreht. Ansonsten ist keine (De-)Kompression feststellbar, die Steigung der Regressionsgeraden liegt sehr nahe bei “1”.

Um die Homingleistungen mit denen des Hauptexperiments (ohne Szenenwechsel) vergleichen zu können haben wir sie in Abbildung 5.11 und 5.12 direkt gegenübergestellt. Es zeigt sich eine starke Verbesserung der Homingleistung sowohl in Genauigkeit (Abb. 5.11) als auch Variabilität (Abb. 5.12). Es existieren weiterhin individuelle Unterschiede, die über den Einfluß des Bewegungsmodells dominieren.

Bei den Versuchspersonen *hege* und *sime*, die das Experiment zweimal mit verschiedenen Bewegungsmodellen durchführten, zeigt sich ein möglicher Lerneffekt. Insbesondere die Variabilität verringerte sich im zweiten experimentellen Block. Diese Verbesserung trat auf, obwohl kein Feedback gegeben wurde. Dies spricht dafür, daß die Versuchspersonen ihre Strategie im Laufe der Zeit auch ohne explizite Erfolgskontrolle⁹ perfektionieren können.

Generell entstand durch den Szenenwechsel im Hauptexperiment eine größere Unsicherheit in den Bewegungsentscheidungen und eine deutlich verringerte Homingleistung. Befragung der Versuchspersonen im Anschluß an das zweite Experiment ergab, daß sie sich durch den fehlenden Szenenwechsel wesentlich sicherer in ihren Entscheidungen fühlten und die Aufgabe als wesentlich einfacher empfanden. Die Versuchspersonen gaben an, ausschließlich landmarkenbasiert navigiert zu haben, Pfadintegration war also durch die zahlreichen Orientierungspunkte unwichtig geworden. Dies zeigt sich auch an den Trajektorien, von denen wir in Abbildung 5.9 exemplarisch einige abgebildet haben. Während *anme* und *hege* mit dem Mausbewegungsmodell direkt zum Ausgangspunkt zurückfuhren, zeigt sich in den übrigen vier experimentellen Blöcken eine Tendenz, vom direkten Weg

⁹Mit “expliziter Erfolgskontrolle” meinen wir Feedback über die Homingleistungen durch den Experimentator oder durch ein Übersichtsbild wie in der Trainingsphase (s. Abb. 4.9).

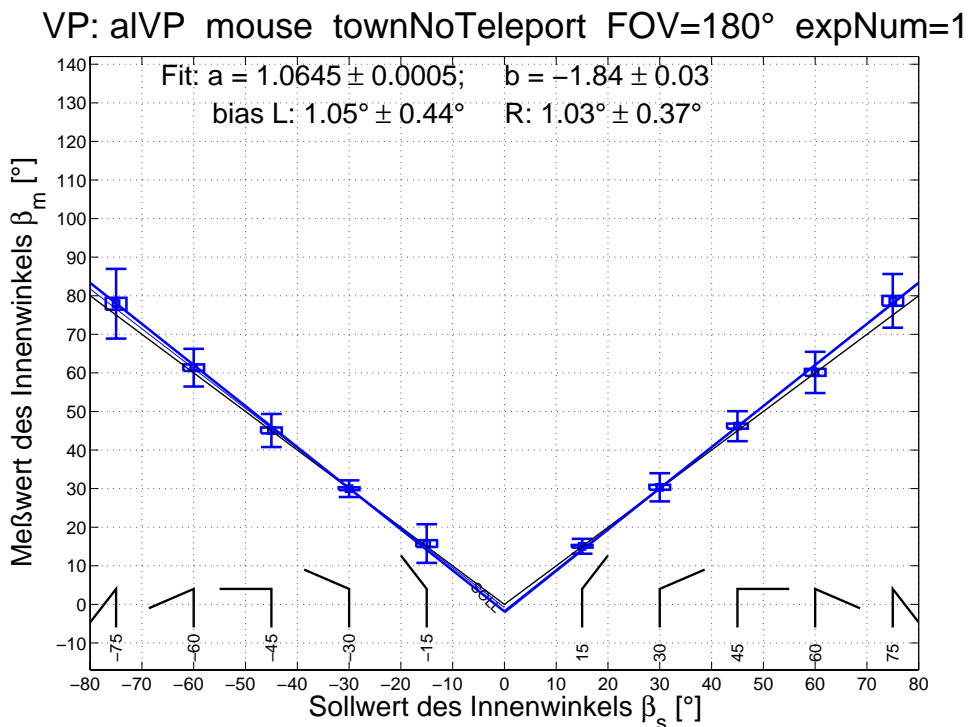
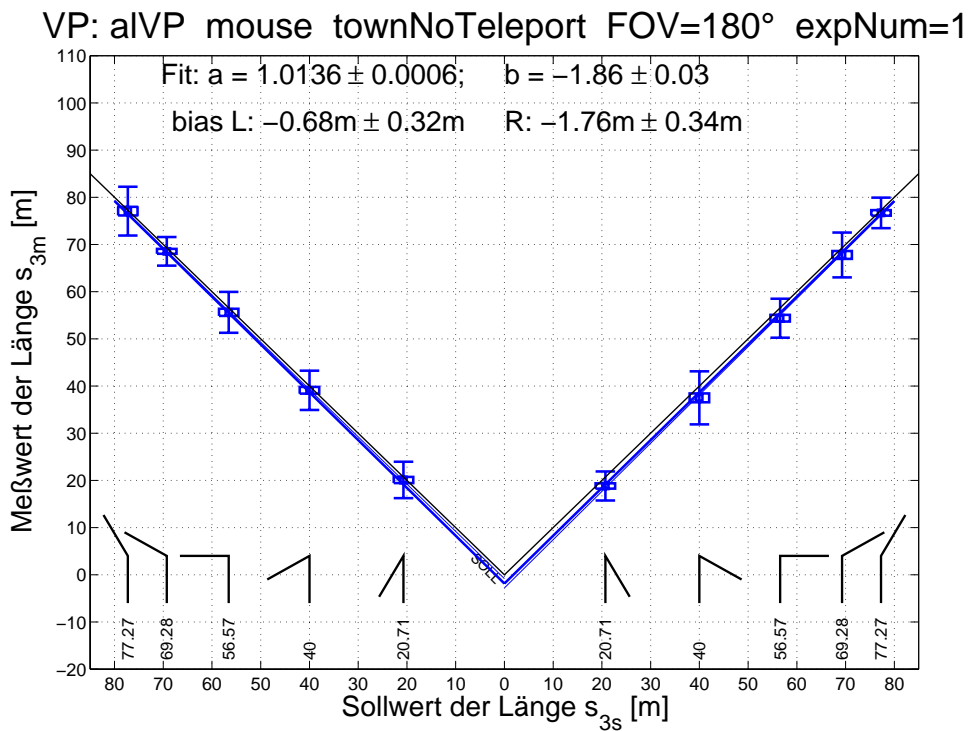


Abbildung 5.10: Darstellung der Homingleistungen in Experiment 2 ohne Szenenwechsel, gemittelt über alle Versuchspersonen und Versuchsbedingungen.

Auffallend ist einerseits die geringe Abweichung vom korrekten Wert, andererseits die geringe Varianz der Daten. Es läßt sich keine Distanz- oder Winkelkompression im Antwortverhalten feststellen. Lediglich für $\beta_s = \pm 75^\circ$ wurde nicht weit genug gedreht.

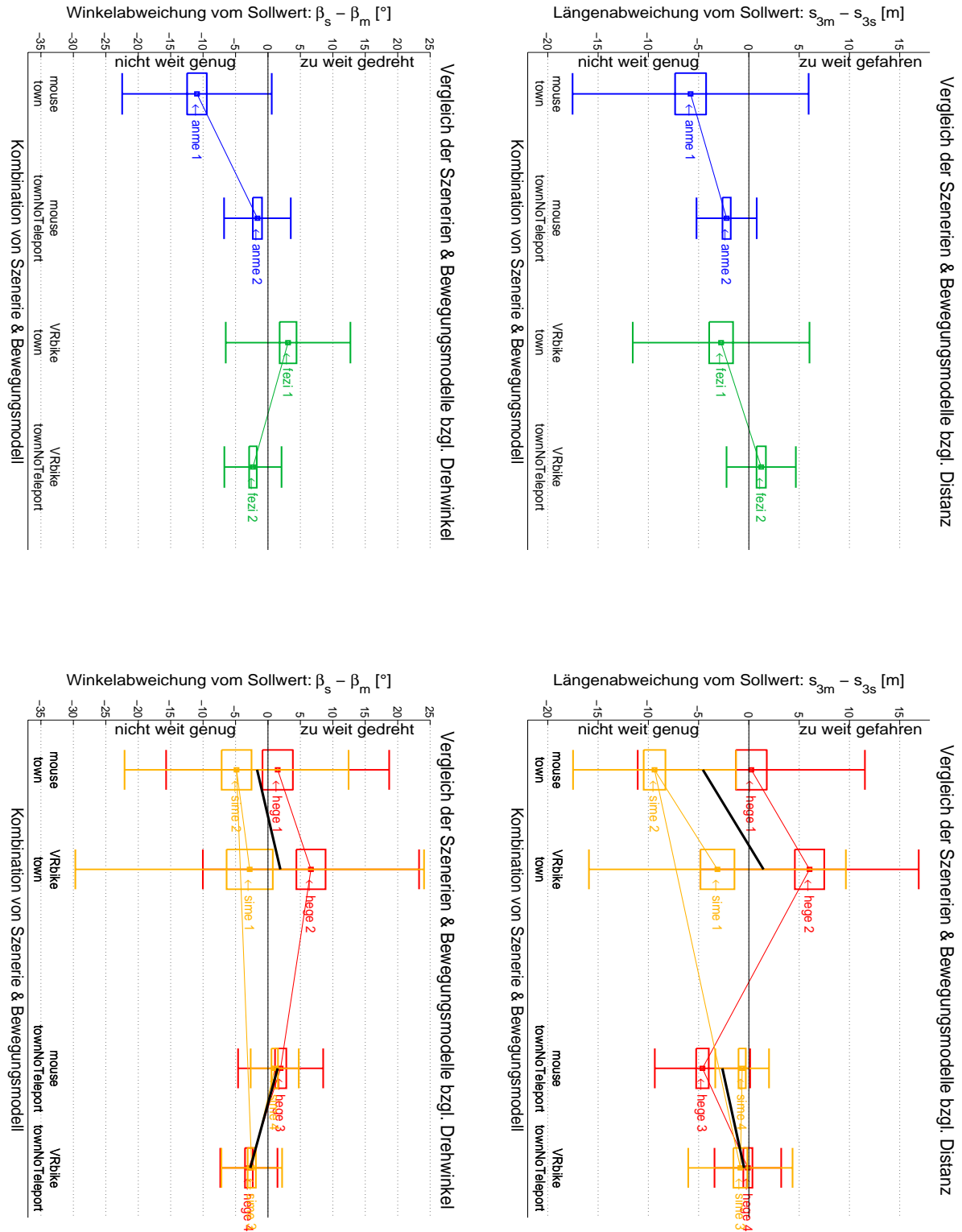


Abbildung 5.11: Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen bezüglich Winkelabweichung (links) und Längenabweichung vom Sollwert (rechts), oben mit und ohne Szenenwechsel, unten wurde zusätzlich das Bewegungsmodell variiert. Die Box stellt den Standardfehler des Mittelwertes dar, die “Whisker” die Standardabweichung (1σ).

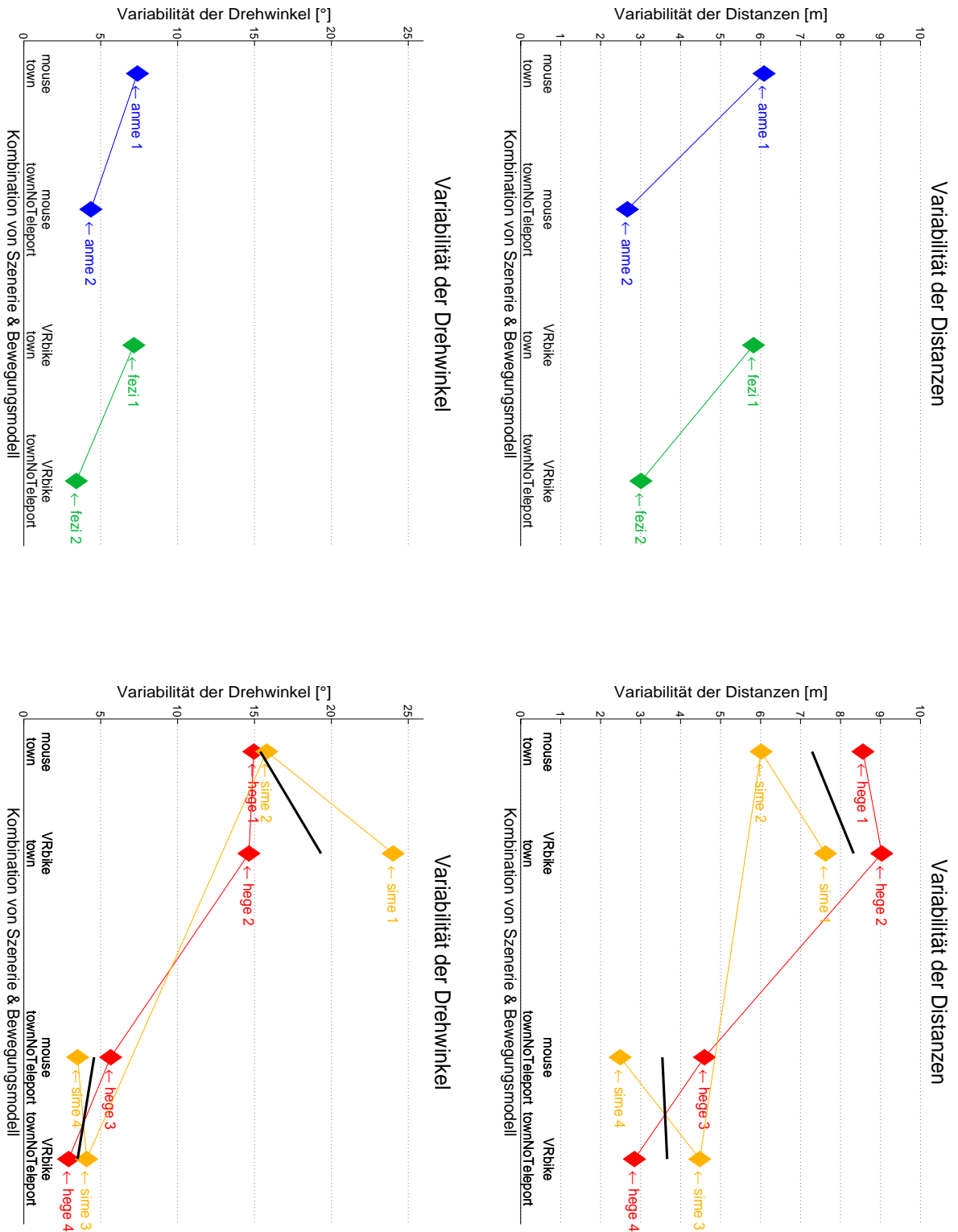


Abbildung 5.12: Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen bezüglich Variabilität in der Winkel- und Distanzantwort (links bzw. rechts). Die Variabilität kann als Maß für die Sicherheit der Versuchspersonen in ihrem Antwortverhalten verstanden werden (vgl. Kap. 5.1.2).

abzuweichen und statt dessen den Ausgangspunkt “von hinten” anzufahren. Dadurch ergibt sich die gleiche Perspektive wie vom Startpunkt aus, wodurch “scene matching”¹⁰ erleichtert wird. Die Befragung der Versuchspersonen bestätigte, daß hauptsächlich scene matching angewandt wurde, um den Ausgangspunkt wiederzufinden. Die mit dem Fahrrad gefahrenen, geschwungenen Trajektorien bestätigten die Vermutung, daß die Dreiecksgeometrie für die Heimfindeleistung unwichtig geworden war, da genügend Informationen für Piloting vorhanden waren (vgl. Abb. 5.9, c-f).

Umgekehrt belegt der Vergleich der ersten beiden Experimente, daß durch die Methode das Szenenwechsels der Einfluß von Piloting als Navigationsmechanismus tatsächlich stark reduziert werden kann.

Weiter zeigt sich, daß Menschen in VU problemlos zum Ausgangspunkt zurückfinden können, wenn nur genügend verlässliche Rauminformation dargeboten wird. Die Versuchsperson *fezi* belegte dies zusätzlich, indem sie in ihrem letzten Homingversuch anstatt direkt zum Ausgangspunkt zurückzufahren, erst noch die gesamte modellierte Welt erkunden wollte. Sie fuhr eine halbe Stunde lang durch die Stadtlandschaft, entfernte sich dabei einige Kilometer vom Ausgangspunkt, und hatte anschließend keinerlei Probleme, wieder metergenau den Startpunkt wiederzufinden¹¹.

¹⁰der Vergleich der momentanen Ansicht mit einer gespeicherten

¹¹Da wir die Versuchspersonen nicht permanent videoüberwachten, hatten wir diesen “Ausflug” erst kurz vor seinem Ende bemerkt. Ansonsten fallen solche Ausflüge natürlich in der Datenauswertung auf.

5.3 Experiment 3 - Neues Fahrradmodell

5.3.1 Motivation

Einige Versuchspersonen bewerteten das Mausbewegungsmodell als angenehmer, da dort Rotationen von Translationen entkoppelt sind. Das Fahrradbewegungsmodell wurde dementsprechend als schwieriger empfunden.

Um die Wichtigkeit dieser Entkoppelung der Freiheitsgrade Rotation und Translation zu untersuchen, entwickelten wir ein neues Fahrradbewegungsmodell, welches (wie das Mausbewegungsmodell) Drehungen auf der Stelle ermöglichte, und verglichen es mit dem alten Fahrradbewegungsmodell. Drehungen auf der Stelle wurden durch Gewichtsverlagerung bzw. Lenkbewegung bewirkt, jeweils in die Richtung, in der man das Fahrrad neigte. Sobald man wieder vorwärts fuhr, wurde auf das herkömmliche Fahrradbewegungsmodell umgeschaltet, das wie ein reales Fahrrad einen nicht verschwindenden Kurvenradius besaß.

5.3.2 Hypothesen

Wir vermuteten einerseits, daß die Möglichkeit auf der Stelle zu Drehen die Genauigkeit und Sicherheit in den Winkelantworten verbessern würde. Andererseits erwarteten wir, daß die Versuchspersonen dieses Bewegungsmodell dem alten vorziehen würden, es also als "leichter zu benutzen" empfänden.

5.3.3 Methoden

Vor dem ersten experimentellen Block jeder Versuchsperson wurden beide Trainingsphasen wie in Kapitel 4.5 beschrieben durchlaufen, vor dem zweiten experimentellen Block nur noch Trainingsphase 2. Das Experiment wurde in der Punktlandschaft durchgeführt, da wir dort den stärksten Effekt erwarteten. Ansonsten war der Versuchsablauf mit dem des Hauptexperimentes identisch (s. Kap. 4.5).

VP	1. Block	2. Block
<i>best</i>	VR Bike new	VR Bike old
<i>miha</i>	VR Bike old	VR Bike new

Tabelle 5.3: Übersicht über das experimentelle Design des 3. Experiments: Vergleich der beiden Fahrradmodelle.

Experimentelles Design

Es handelte sich um einen gemischten within-subject¹² und between-subject Versuchsplan. Wie in Kap. 4.4 beschrieben wurden innerhalb eines experimentellen Blocks die Dreiecksgeometrien variiert, zwischen den experimentellen Blöcken wurden das Fahrradbewegungsmodell variiert (s. Tab. 5.3).

Versuchspersonen

Am Vergleichsexperiment zwischen den beiden Fahrradbewegungsmodellen nahmen drei naive Versuchspersonen teil (*best*, *betu* und *miha*). *betu* wurde nicht in die Auswertung aufgenommen, da sie eine offensichtlich falsche Strategie verfolgte, die sie erst im Laufe des zweiten experimentellen Blocks erkannte und durch eine korrekte ersetzte. Siehe Kapitel 5.3.5 für eine detaillierte Beschreibung des Falles.

5.3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse sind im Detail im Anhang A.3, Abbildung A.13 und A.14 dargestellt. Fehler und Variabilität der Verhaltensantworten der beiden Versuchspersonen sind in Abbildung 5.13 für die beiden Bewegungsmodelle gegenübergestellt. Es zeigt sich kein klarer Einfluß des Fahrradmodells auf die Homingleistung.

Mit dem *neuen* Fahrradmodell wurde generell auf der Stelle gedreht, die Trajektorien glichen somit qualitativ denen des Mausmodells. Der Homingfehler wurde in einer 2-faktoriellen Varianzanalyse (*MANOVA*) analysiert (10 Winkel α x 2 Bewegungsmodelle). Unabhängige Variablen waren die Winkel- und Längenabweichung vom Sollwert $\beta_s - \beta_m$ bzw. $s_{3_m} - s_{3_s}$. Entgegen unserer ersten Hypothese zeigte sich kein signifikanter Effekt des Faktors Fahrradbewegungsmodell bezüglich des Winkelfehlers ($F[1,1]=0.610$, $p=0.578$) oder des Distanzfehlers ($F[1,1]=0.420$, $p=0.634$). Einzig signifikanter Effekt war die Dreiecksgeometrie in Bezug auf den Distanzfehler ($F[9,9]=10.379$, $p=0.001$): Für kleine Distanzen wurde zu weit gefahren, für große nicht weit genug (s. Abb 5.14, oben). Es zeigte sich also erneut eine Kompression in der Verhaltensantwort, wie sie bereits im Hauptexperiment gefunden wurde.

Die zweite Hypothese wurde in der Befragung der Versuchspersonen im Anschluß an das jeweils letzte Experiment bestätigt: Das neue Fahrradbewegungsmodell, das zusätzlich Drehungen ohne gleichzeitige Translation gestattete, wurde als "einfacher zu bedienen" und "angenehmer" bewertet, wenn auch als weniger "realistisch". Interessanterweise hatte diese subjektive Bevorzugung jedoch keinen Effekt auf das Heimfindeverhalten. Eine angenehmeres Eingabemedium muß also nicht mit einer verbesserten Performance einhergehen. Die Entkopplung der Bewegungsfreiheitsgrade Translation und Rotation kann somit nicht als wesentlicher Grund für die Unterschiede zwischen den Bewegungsmodellen Maus und VR Bike im Hauptexperiment verantwortlich gemacht werden.

¹²d. h. mit Meßwiederholung

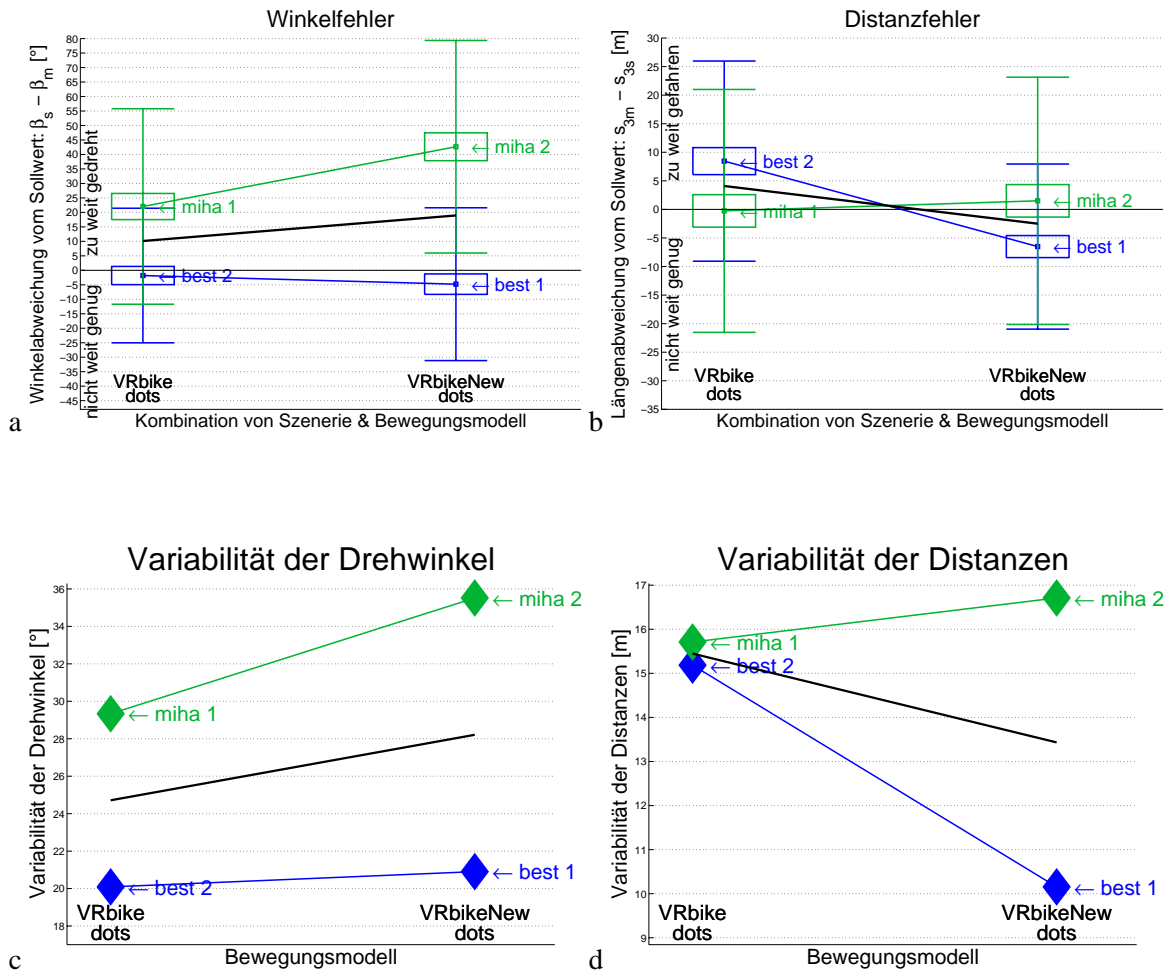


Abbildung 5.13: Vergleich der beiden Fahrradbewegungsmodelle bezüglich der Fehler im Drehwinkel (a) und in der gefahrenen Distanz (b) sowie bezüglich der Variabilität in der Winkel- und Distanzantwort (c bzw. d).

Es zeigt sich kein klarer Einfluß des Bewegungsmodells. Die beiden Versuchspersonen unterscheiden sich erheblich in ihrer Winkelantwort und in der Variabilität ihrer Bewegungsentscheidungen. *miha* drehte für beide Bewegungsmodelle zu weit.

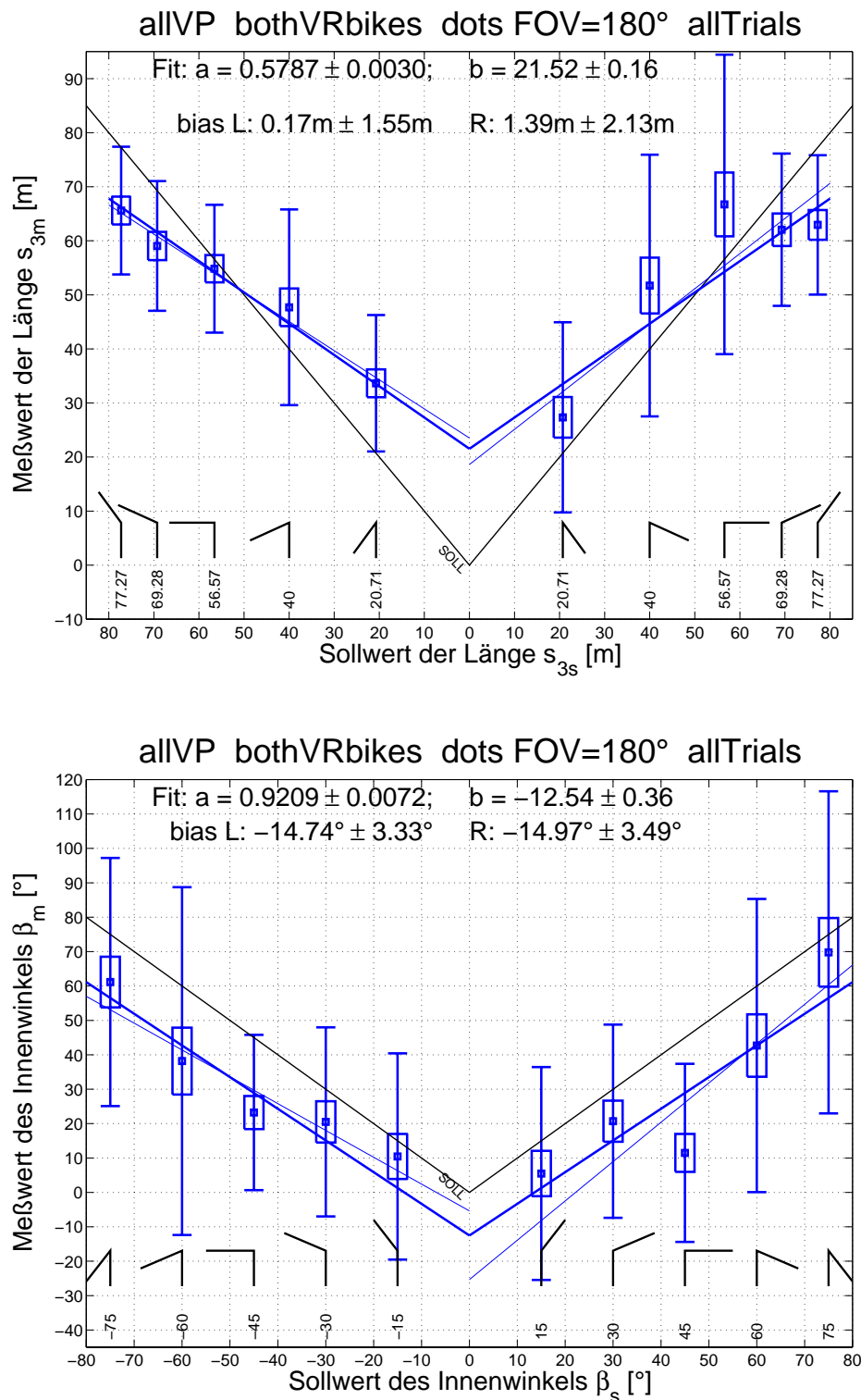


Abbildung 5.14: Über die beiden Fahrradbewegungsmodelle und die beiden Versuchspersonen *best* und *miha* gemittelte Verhaltensantwort.

Deutlich sichtbar ist die Kompression in der Verhaltensantwort und die größere Varianz der Winkelantwort für kleine Winkel α . Da wir keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Fahrradbewegungsmodellen fanden, haben wir hier nur die gemittelten Werte dargestellt. Legende wie in Abb. 5.2.

5.3.5 Strategie der Versuchsperson *betu* - Ergebnisse und Diskussion

Von besonderem Interesse ist die Strategie der Versuchsperson *betu* (s. Abb. 5.15). Sie fuhr in ihren Homingversuchen mit hoher Genauigkeit stets nach "Süden", drehte also an \bar{x}_2^{\rightarrow} nicht weit genug. Befragung der Versuchsperson im Anschluß an das Experiment gaben Einsicht in ihre Strategie: Sie hatte versucht, an \bar{x}_2^{\rightarrow} so weit zu drehen, daß sich die Drehwinkel an \bar{x}_1^{\rightarrow} und \bar{x}_2^{\rightarrow} zu 180° aufaddieren:

$$(180^\circ - \alpha_m) + (180^\circ - \beta_m) = \overline{\alpha_m} + \overline{\beta_m} \stackrel{!}{=} 180^\circ$$

Wie sie später (während des zweiten experimentellen Blocks) erkannte, hatte sie "eigentlich" die Formel gemeint, wonach die Summe der Innenwinkel eines Dreiecks 180° beträgt:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

Die Befragung der Versuchsperson *betu* ergab auch, daß sie die verschiedenen Winkel α zwischen dem ersten und zweiten Dreieckssegment korrekt wahrgenommen hatte, ebenso hatte sie die beiden Schenkellängen s_1 und s_2 korrekt als gleich lang wahrgenommen. Ähnliche Ergebnisse ergaben Befragungen anderer Versuchspersonen. Es trat also kein systematischer Kodierfehler im Winkel auf, und gleichlange Strecken wurden als solche wahrgenommen. Berücksichtigt man dies, so läßt sich aus den Verhaltensantworten schließen, daß *betu* in der Lage war, sehr genau um den intendierten Winkel zu drehen.

Dies ist ein fundamentaler Unterschied zu den Experimenten von Péruch et al. (1997), in denen Versuchspersonen eine klare Tendenz zeigten, um weniger als den intendierten Winkel zu drehen: In einem Kontrollexperiment sollten sich Versuchspersonen zum Ausgangspunkt zurückdrehen, nachdem sie den ersten Zielpunkt \bar{x}_1^{\rightarrow} erreicht hatten. Anstatt der geforderten 180° drehten sie sich im Mittel jedoch lediglich um $150.4^\circ \pm 0.9^\circ$, was einer Unterschätzung der simulierten Eigendrehung um 30° entspricht. Da angenommen werden kann, daß die Versuchspersonen wußten, daß sie sich um 180° drehen sollten, aber statt dessen um 150° drehten, kann dieser Bias entgegen der Interpretation von Péruch et al. (1997) *nicht* durch einen Kodierfehler ("encoding error" gemäß Fujita et al. (1993)) erklärt werden, sondern nur als systematischer Fehler in der Ausführung (output error).

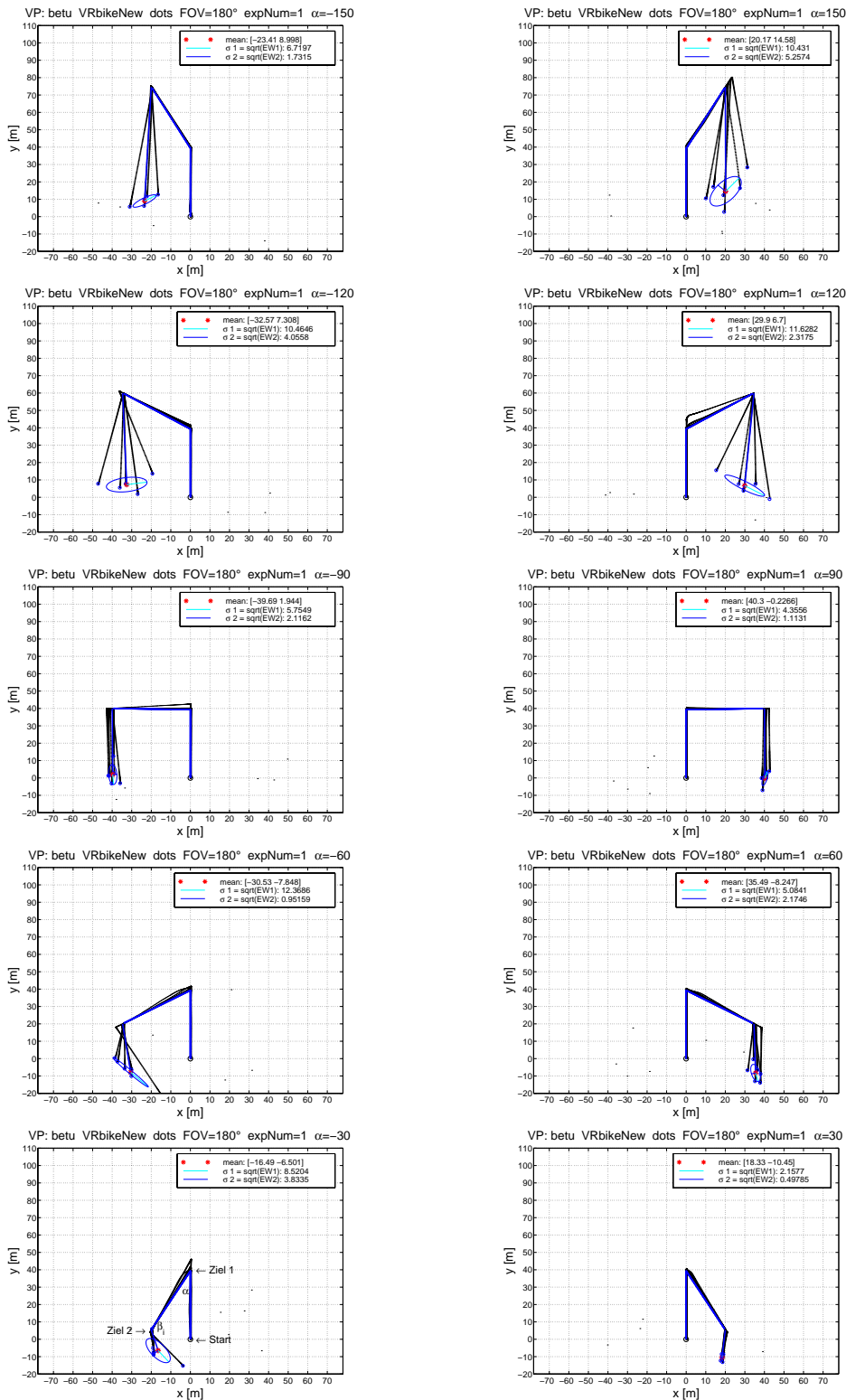


Abbildung 5.15: Verhaltensantwort (beobachtete Trajektorien) der Versuchsperson *betu*. Deutlich erkennbar ist deren “Strategie”, stets nach “Süden” zu fahren. Legende wie in Abb. 5.1.

5.4 Experiment 4 - Variation des Gesichtsfeldes

5.4.1 Motivation und Hypothesen

Im vierten und letzten Experiment untersuchten wir den Einfluß des horizontalen FOV auf die Homingleistungen. Über die systematische Variation des FOV wurde einerseits der Einfluß des peripheren Sehens bzw. des optischen Flusses untersucht, andererseits der Einfluß der simultan dargebotenen Information: Für ein kleines FOV ist die "auf einmal" wahrgenommene Information wesentlich geringer als die im Laufe der Fortbewegung insgesamt gesehene Information. Es stellt sich die Frage, wie der Beobachter diese zeitlich gestaffelt dargebotene Rauminformation (insbesondere während einer Drehung) aufintegrieren bzw. kombinieren kann, um eine kohärente Raumrepräsentation zu erlangen.

Wir erwarteten, daß sich die Homingleistungen mit abnehmendem FOV wesentlich verschlechtern würden. Weiter vermuteten wir, daß die Reduktion des FOV eine Veränderung der verwendeten Strategie bewirken würde.

5.4.2 Methoden

Das FOV-Experiment bestand aus sechs Blöcken für jede Versuchsperson. In den ersten fünf wurde das FOV schrittweise halbiert, von 180° bis auf 11.25° . Der letzte Block war mit dem ersten identisch. Darüber wurde getestet, ob im Laufe der Experimente ein Lerneffekt oder andere systematische Veränderungen der Verhaltensantworten stattfanden. Die Versuchsumgebung war stets die Punktwolke, das Bewegungsmodell war das ursprüngliche Fahrradmodell. Einziger unabhängiger Parameter war das FOV (s. Tab. 5.4). Wir hatten anfangs überlegt, das FOV *innerhalb* eines Blocks zu randomisieren, wodurch der Lerneffekt vom FOV-Effekte entkoppelt gewesen wäre. Wie entschieden uns letztendlich jedoch dagegen, da wir u.a. an den Strategien interessiert waren, die je nach FOV entwickelt und verwendet werden, und sich diese Strategien in einer randomisierten FOV-Abfolge nicht klar ausprägen können.

	Kontrollparameter (unabh. Var.)						Meßgröße (abh. Var.)	
horizontales FOV	180°	90°	45°	22.5°	11.25°	180°	je 60 Winkel β_m	je 60 Distanzen s_{3m}
Nummer des experimentellen Blocks (expNum)	1	2	3	4	5	6	für vier Versuchspersonen	

Tabelle 5.4: Übersicht über das experimentelle Design des FOV-Experiments. Das Experiment wurde von vier erfahrenen Versuchspersonen mit dem VR Bike in der Punktwolke durchgeführt.

Das Experiment wurde von vier Versuchspersonen durchgeführt, die bereits mit dem Versuchsaufbau, der Szenerie und dem VR Bike vertraut waren. Vor jedem Block führten wir nur noch eine kurze

Gewöhnungsphase durch, in der die Versuchspersonen ohne explizite Erfolgskontrolle fünf Dreiecke “zur Probe” fahren durften. Dadurch hatten sie genügend Zeit, sich an das veränderte FOV zu gewöhnen und ihre Strategie wenn nötig anzupassen.

5.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Abweichung von Sollwert

Die Ergebnisse sind detailliert im Anhang A.4, Abbildungen A.15 - A.18 dargestellt. In Abbildung 5.16 sind die Ergebnisse des FOV-Experiments in zwei Graphiken zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß die Analyse der Abweichung der beobachteten von den korrekten Verhaltensantworten (Abb. 5.16) zu keinem einfach zu interpretierenden Resultat führt. Die Ergebnisse der Versuchspersonen sind verschiedenartig und lassen sich nur bedingt miteinander vergleichen. Zudem ist nicht auszuschließen, daß ein Lerneffekt stattfand und mit dem Einfluß des FOV konfundiert ist, obwohl kein explizites Feedback über die Homingleistungen gegeben wurde. In der folgenden Analyse der beobachteten Ergebnisse wird erst die Zuhilfenahme der Hintergrundinformationen über die verwendeten Strategien ein klarere Interpretation ermöglichen.

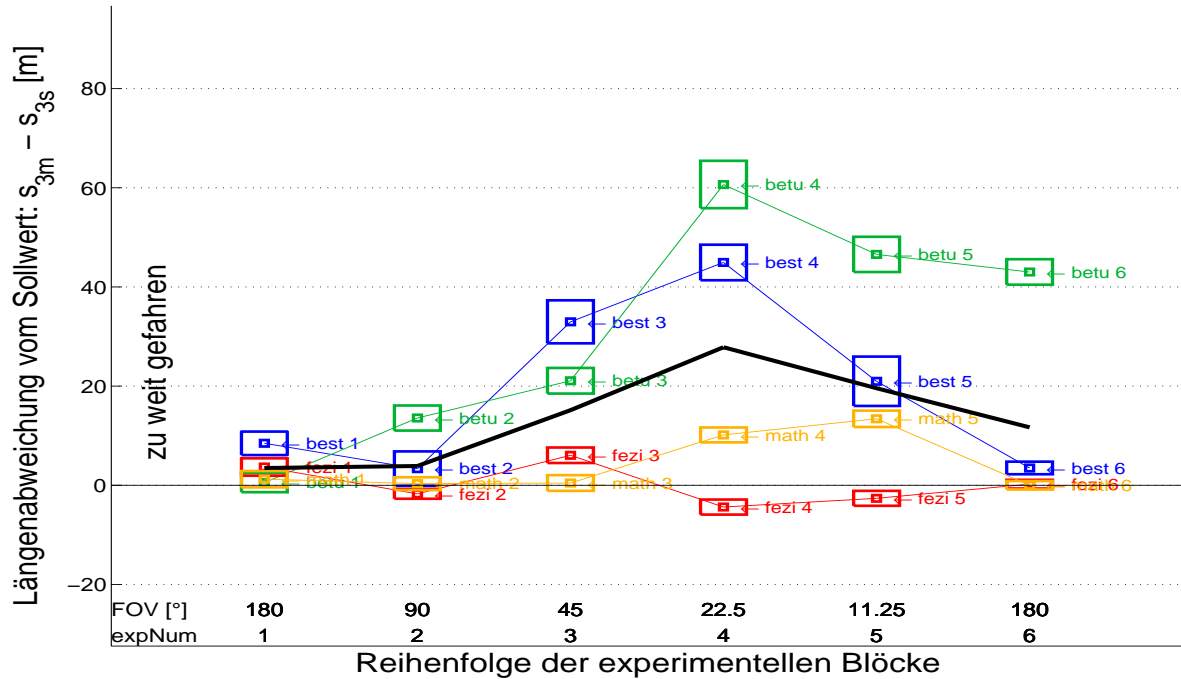
In der Distanzantwort ist in Abbildung 5.16 für die Versuchspersonen *best*, *betu* und *math* ein klarere Trend abzulesen: Für ein $\text{FOV} \leq 45^\circ$ führen sie wesentlich zu weit. Interessanterweise verbesserten sich *best* und *betu* für das kleinste FOV wieder, was die Verwendung einer effizienteren Strategie nahelegt, die wir in Kapitel 5.4.3 besprechen wollen. In der Winkelantwort zeigt sich für das kleinste FOV eine erhebliche Abweichung vom Sollwert. *betu* und *math* drehten im Mittel um 90° zu weit, drehten sich also um mehr als 180° ¹³. Im letzten Block (der Wiederholung des ersten) zeigte sich in der Distanzantwort ein interessanter Effekt. Während die Versuchspersonen *best*, *fezi* und *math* eine korrekte Distanzantwort gaben, fuhr *betu* im Mittel doppelt so weit, wie der korrekten Rückweglänge entsprochen hätte. Ihre Winkelantwort ist hingegen sehr präzise und von geringer Variabilität. Wir vermuteten, daß sich die Versuchsperson *betu* im Laufe der Experimente immer mehr auf die Winkelantwort konzentrierte und darüber die Distanzantwort vernachlässigte, was Sie in der abschließenden Befragung bestätigte. Dies bestätigte unsere Hypothese, daß Bewegungsentscheidungen für Drehung und Translation zwei separate Prozesse sein können, die mit spezifischen systematischen Fehlern behaftet sind.

Variabilität der Bewegungsentscheidungen

Um die Sicherheit der Bewegungsentscheidungen in Abhängigkeit vom FOV zu analysieren, ist in Abbildung 5.17 die Variabilität der Distanz- und Winkelantworten aufgetragen (vgl. Kap. 5.1.2). Auch

¹³Der “Innenwinkel” β ist für Drehungen um $\bar{\beta} \geq 180^\circ$ dadurch streng genommen nicht mehr definiert. Um die Daten dennoch darstellen zu können haben wir den Innenwinkel β stetig ins negative fortgesetzt, wie sich in Abbildung A.16 und A.18 sehen läßt.

Vergleich der Versuchsbedingungen bzgl. Distanz



Vergleich der Versuchsbedingungen bzgl. Drehwinkel

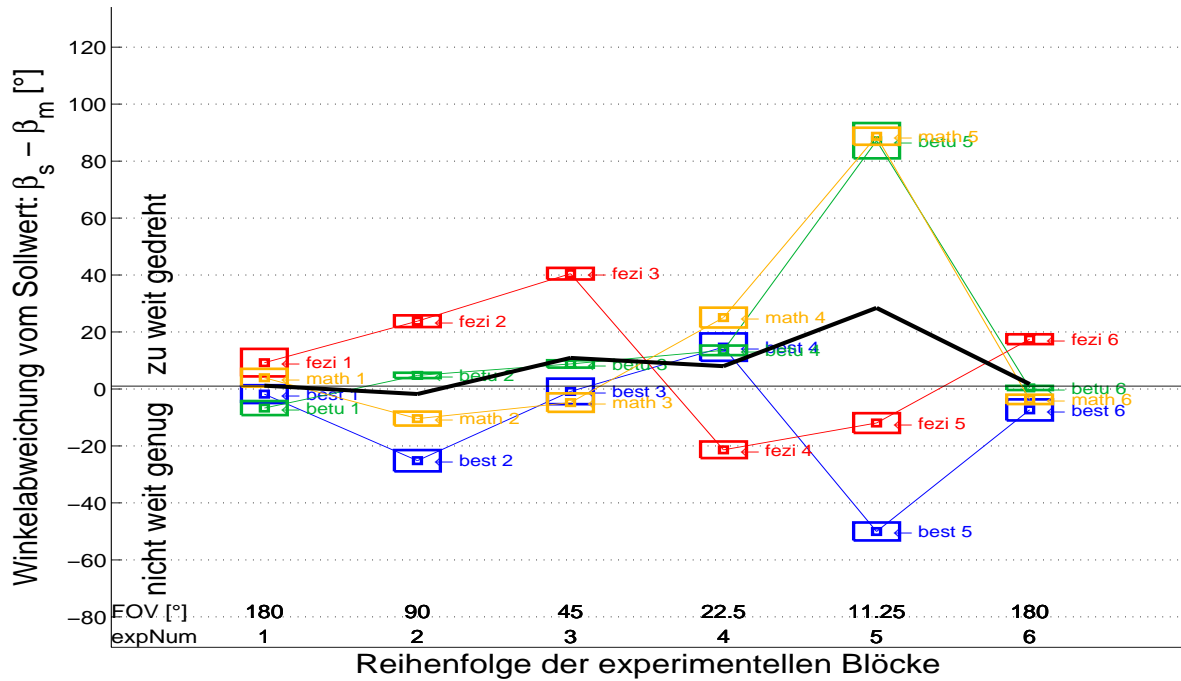
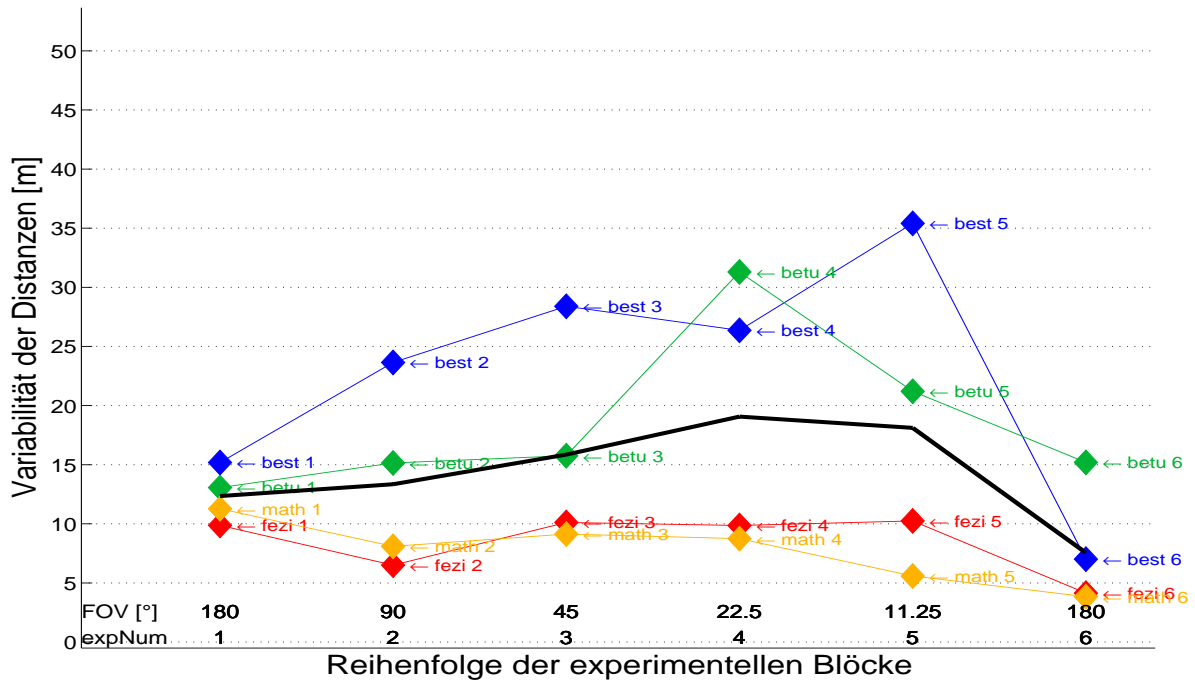


Abbildung 5.16: Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen (FOV) bezüglich Winkelabweichung (unten) und Längenabweichung vom Sollwert (oben). Die Box stellt den Standardfehler des Mittelwertes dar.

Variabilität der Distanzen



Variabilität der Drehwinkel

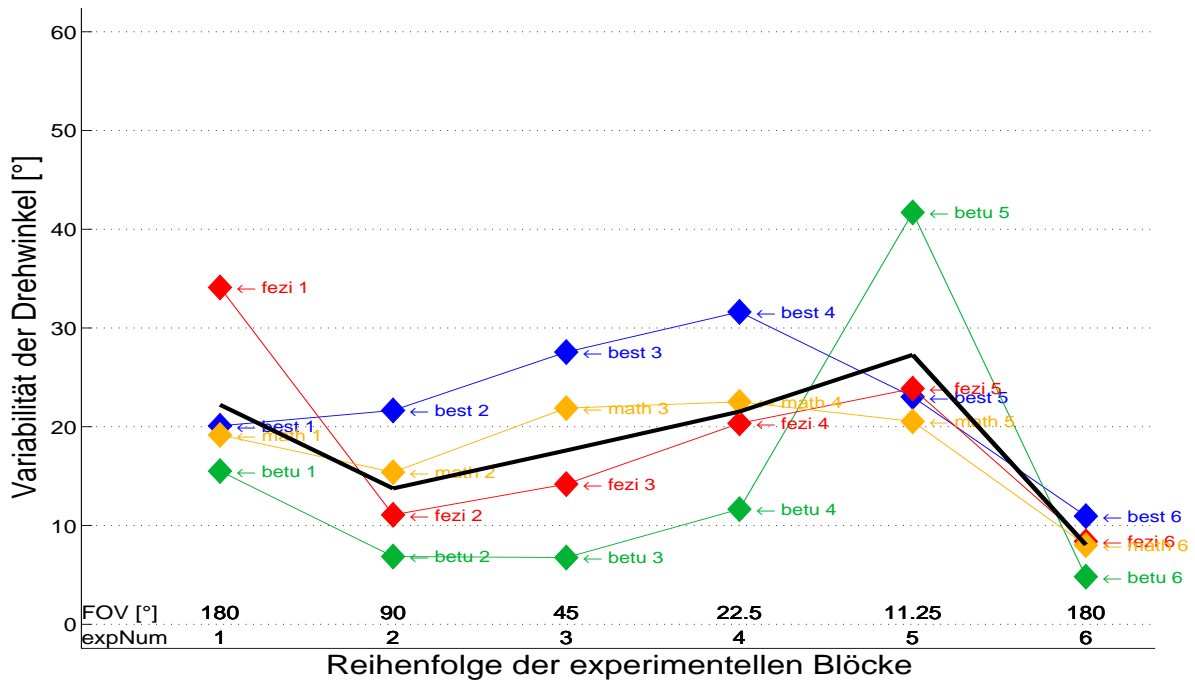


Abbildung 5.17: Vergleich der verschiedenen Versuchsbedingungen bezüglich Variabilität in der Winkel- und Distanzantwort (unten bzw. oben). Die Variabilität kann als Maß für die Sicherheit der Versuchspersonen in ihrem Antwortverhalten verstanden werden (vgl. Kap. 5.1.2).

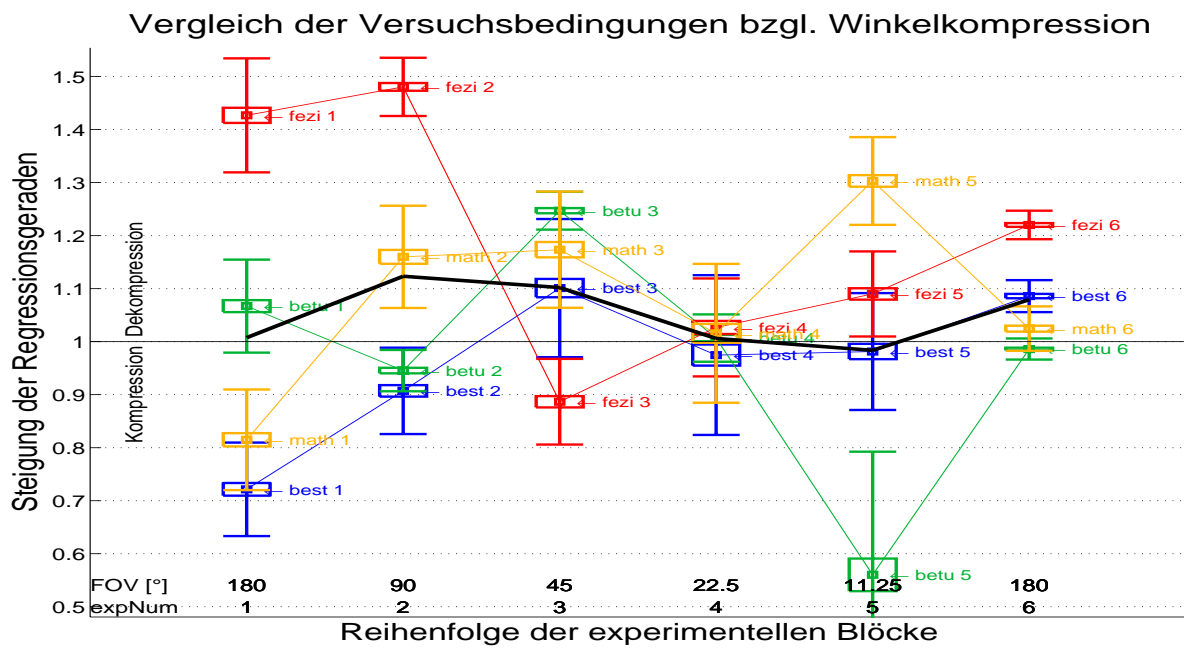
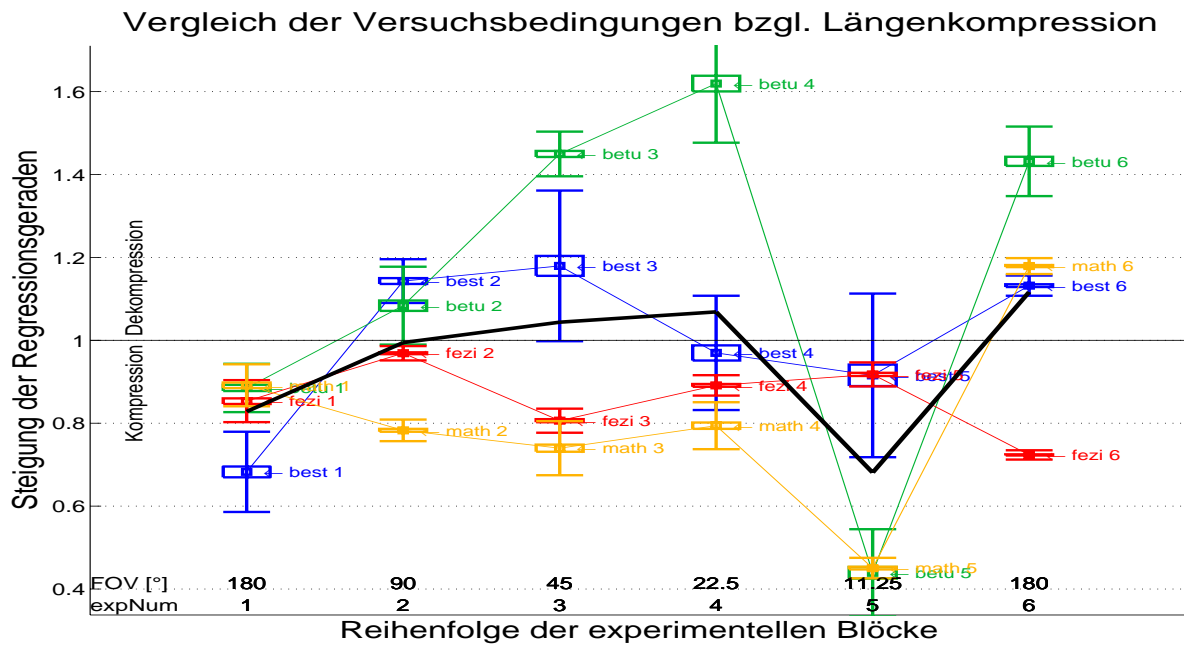


Abbildung 5.18: Dargestellt ist die Steigung der Regressionsgeraden (vgl. Abb. 5.2, 5.3 und Kap. 5.1.2) für die verschiedenen Versuchsbedingungen und Versuchspersonen. Eine Steigung < 1 bedeutet eine Verschiebung der Verhaltensantwort hin zum Mittelwert, also eine “Kompression”. Unten die (De-)Kompression der Winkel in der Abbildung $\beta_s \rightarrow \beta_m(\beta_s)$, quantifiziert durch die Steigung der Regressionsgeraden $\beta_m(\beta_s; a, b) = a \cdot \beta_s + b$ (vgl. Abb. 5.3). Oben die (De-)Kompression der Längen $s_{3_s} \rightarrow s_{3_m}(s_{3_s})$. Die Mittelwerte über eine Versuchsbedingung sind als schwarze Linie aufgetragen.

hierbei zeigen sich große Unterschiede zwischen den Versuchspersonen. So zeigen *fezi* und *math* in der Variabilität der Distanzantwort eine weitgehende Unabhängigkeit vom FOV, ebenso *math* bezüglich der Variabilität der Winkelantwort. Da sich deren Ergebnisse im letzten experimentellen Block wesentlich verbessert haben, ist zu vermuten, daß ein Lerneffekt auftrat oder ein Strategiewechsel stattfand, und dieser den Einfluß des reduzierten FOV weitgehend kompensierte. Für die restlichen Ergebnisse zeigt sich eine positive Korrelation zwischen verringertem FOV und erhöhter Variabilität, mit einer maximalen Variabilität bei 22.5° bzw. 11.25° FOV. Abgesehen von der Distanzantwort von *betu*, in der sich im Laufe der Zeit eine deutliche Längenunterschätzung mit großer Varianz einstellte, verringerte sich die Varianz zwischen dem ersten und letzten Block deutlich.

Kompression der Verhaltensantworten - Analyse der Regressionsgeraden.

Wie im im Anhang A.4, Abbildungen A.15 - A.18 zu sehen ist, lassen sich die Ergebnisse gut durch eine Regressionsgerade anpassen. Die Parameter der Regressionsgeraden stellen also auch in diesem Experiment eine sinnvolle Zusammenfassung der Homingleistungen dar (vgl. Kap. 5.1.2). In Abbildung 5.18 haben wir die Steigung der Regressionsgeraden für die Versuchspersonen und Versuchsbedingungen gegenübergestellt.

Distanzantwort Auch hier zeigen sich große Unterschiede zwischen den Versuchspersonen. Während die Ergebnisse von *math* und *fezi* für alle FOV eine Längenkompression aufweisen, zeigt sich für *best* und *betu* in den ersten drei Blöcken ein Wechsel von Kompression zu Dekompression. Bei einer weiteren Verkleinerung des FOV schlägt diese Längendekompression jedoch wieder in eine Kompression um, so daß sich für ein FOV von 11.25° bei allen Versuchspersonen eine Kompression der Längenantwort zeigt.

Winkelantwort In der Kompression der Drehwinkel zeigt sich ein deutlicher, wenngleich versuchspersonenabhängiger Einfluß des FOV. Für *fezi* zeigte sich bei dem Wechsel von 90° auf 45° FOV eine deutlicher Wechsel von Dekompression zu Kompression, die sich für die nachfolgenden Blöcke wieder in eine Dekompression wandelte. Für die anderen Versuchspersonen zeigten sich uneinheitlichere Effekte. Interessanterweise war für ein FOV von 22.5° die (De-)Kompression bei allen Versuchspersonen am geringsten, wenngleich von hoher Varianz.

Im letzten Block zeigte sich bei allen Versuchspersonen eine deutliche Verbesserung gegenüber dem ersten Block. Die Versuchspersonen hatten also ohne explizite Rückmeldung über ihre Homingleistung ihre Winkelantwort verbessern können (im Sinne eines Kompressionsfaktors $a \approx 1$). Die Varianz der Regressionsgeraden nahm durch die Reduktion des FOV kaum zu, fiel dann jedoch im letzten Block ab auf einen Wert, der deutlich unter dem des ersten Blocks lag.

Strategien im FOV-Experiment

Im folgenden wollen wir über die Strategien berichten, die sich aus der Beobachtung der Versuchspersonen über die Videokamera und über die Analyse der Fragebögen zum Experiment ableiten ließen.

Um die Distanzen und Drehwinkel abzuschätzen wurde das zu navigierende Dreieck mental vorgestellt, anfangs bei drei der vier Versuchspersonen unter Zuhilfenahme der Hände, Arme oder einzelner Finger zur Visualisierung. Das erste Dreieckssegment s_1 war dabei nach oben (“Norden”) hin ausgerichtet, in Analogie zum Übersichtsbild auf dem separaten Monitor in der Trainingsphase 1 (s. Abb. 4.9).

Anfangs wurde gelegentlich versucht, zurückgelegte Distanzen über die Anzahl der Pedalumdrehungen oder die benötigte Zeit abgeschätzt. Im Laufe des Experiments wurde darauf jedoch verzichtet, da dieses Verfahren subjektiv als “kaum hilfreich” und “ablenkend” empfunden wurde. Zudem erschwerten Gangschaltung und Leerlauf die Distanzschätzung über das Zählen der Pedalumdrehungen.

Bei allen Versuchspersonen bewirkte die Reduktion des FOV eine Veränderung der Strategie, mit der Drehungen abgeschätzt wurden. Es wurden zwei Klassen von Strategien beobachtet, die wir hier als Strategie 1 und 2 bezeichnen wollen.

Strategie 1 war die analytischere der beiden und bestand darin, das horizontale FOV mental zu halbieren, zu vierteln oder zu sechsteln, um darüber eine Art Basiswinkel (“Winkelquant”) $\Delta\varphi$ zu definieren. Drehungen wurden mental als Vielfache dieses Basiswinkels $\Delta\varphi$ vorgestellt und ausgeführt. Besonders auffällig war diese Strategie bei den Versuchspersonen *best* und *betu*, die jeweils um $\Delta\varphi = FOV/2$ drehten, dann die Drehung stoppten, wiederum um $\Delta\varphi$ drehten usw. Für ein relativ großes FOV ($\geq 45^\circ$) wurde diese Strategie subjektiv als befriedigend und effizient wahrgenommen, bei einer weiteren Reduktion des FOV stieß sie jedoch an ihre Grenzen: Versuchspersonen empfanden Strategie 1 für kleiner werdende FOV zunehmend als langwierig und störend, so daß sie eine zweite Strategie entwickelten.

Strategie 2 bestand darin, bei Drehungen die um den Beobachter rotierende VU mit dem ausgestreckten Arm oder den Augen kontinuierlich mitzuverfolgen. Der Arm bzw. die Blickrichtung wurden also als eine Art Pointer verwendet, der kontinuierlich einen Punkt der VU verfolgt, unabhängig davon, ob dieser gerade im Gesichtsfeld sichtbar war oder nicht. Der Pointer hatte dadurch eine kompaßähnliche Funktion, definierte also eine globale Richtung. Diese Strategie ist nicht unbekannt und wurde bereits bei anderen Experimenten beobachtet (Sellen, 1998). Strategie 2 wurde auch bei dem kleinsten FOV als angenehm empfunden, zudem war sie weniger langwierig als Strategie 1.

Der Wechsel von Strategie 1 zu Strategie 2 korreliert mit der qualitativen Änderung der Verhaltensantworten, die sich in Abbildung 5.16 - 5.18 zeigt: Die Versuchspersonen *best* und *betu* wechselten ihre Strategie bei der Reduktion des FOV auf 11.25° , *fezi* bereits bei 22.5° .

Die Versuchsperson *math* verwendete von Anfang an eine Mischstrategie, die sich nicht grundlegend veränderte. *math* empfand im Gegensatz zu den anderen Versuchspersonen die Beurteilung der Drehwinkel bei einem FOV von 45° und 22.5° am einfachsten. Als Grund führte er an, daß dort durch die

Sichtfeldbegrenzung ein klarer Referenzwinkel definiert sei, der für ein FOV von 180° bzw. 11.25° zu groß bzw. zu klein sei, für 22.5° und 45° aber einen guten Bezugsrahmen darstelle.

5.5 Auswertung der Fragebögen - Verwendete Strategien

Über eine kleine Videokamera konnte der Versuchsraum überwacht werden, sofern die Versuchspersonen einverstanden waren. Dadurch konnte oft deren Strategie elizitiert werden, wenn sie z.B. einzelne Objekte bei Drehungen mit ihrem Kopf verfolgten oder ihre Hände benutzten, um das gefahrenen Dreieck zu visualisieren und den nötigen Drehwinkel β zu bestimmen. In allen Fällen stimmten diese Beobachtungen sehr gut mit den Antworten der Versuchspersonen bezüglich der von ihnen verwendeten Strategien überein, die sie im Fragebogen zum Experiment (s. Abb. B.4) aufschrieben. Dies werteten wir als zusätzliche Legitimation, die verwendeten Strategien mit Verhaltensmaßen zu korrelieren.

Im folgenden werden wir nur über die Strategien im ersten und dritten Experimente berichten. Durch den fehlenden Szenenwechsel in Experiment zwei wurden dort grundlegend andere Strategien verwendet, im wesentlichen reines "scene matching", wie in Kapitel 5.2 beschrieben. Im FOV-Experiment wurden die Strategien bereits erläutert, da dies zur Interpretation der Ergebnisse nötig war.

Intuitive/keine Strategie

Nur eine Versuchsperson (*chfl*) gab an, keine explizite Strategie zur Dreiecksvervollständigung anzuwenden, sondern einfach nur "intuitiv" zu fahren. Ihre Verhaltensantworten sind gleichzeitig die einzigen, die keinen Zusammenhang zur Dreiecksgeometrie erkennen lassen. Dies zeigt sich an der Steigung der Regressionsgeraden, die für alle drei experimentelle Blöcke und sowohl für Winkel- als auch Distanzantwort bei etwa Null liegt (s. Abb. A.10). An der zweiten Dreiecksecke \vec{x}_2 angelangt drehte sie sich also stets um etwa denselben Betrag $|\overline{\beta}_m|$ und fuhr dann um etwa dieselbe Strecke s_{3_m} .

Mentale Vorstellung

Die meisten Versuchspersonen gaben an, ein bildartiges, geometrisches mentales Modell des Dreiecks zu haben. Dieses war, wenn spezifiziert, nach "Norden" ausgerichtet, also gleich orientiert wie das Übersichtsbild auf dem separaten Monitor in der Trainingsphase.

Die Versuchspersonen verwendeten verschiedene Strategien, um sich das Dreieck und den zu drehenden Winkel β besser vorstellen zu können. Einige malten das Dreieck mit dem Finger in die Luft oder auf das Bein (VR Bike) bzw. den Tisch (Maus), andere benützten ihre Finger, um die Dreieckskanten zu visualisieren. Gelegentlich wurde auch versucht, die zu drehenden Winkel im Kopf auszurechnen, was jedoch meist zu keiner Verbesserung der Ergebnisse führte.

Keine unserer Versuchspersonen gab an, einen Homingvektor zur Lösung der Heimfindaufgabe verwendet zu haben. Dies ist erstaunlich, da in der Versuchsanleitung der Homingvektor explizit als mögliche Navigationsstrategie vorgeschlagen wird (s. Abb. B.1).

Distanzen

Einige Versuchspersonen benützten anfangs die Anzahl der Pedalumdrehungen, um Distanzen besser abschätzen zu können. Im Laufe des Experiments verzichteten sie jedoch meist wieder darauf, da diese Strategie als stören und nur bedingt hilfreich empfunden wurde¹⁴.

Eine Versuchsperson (*sime*) stellte sich als Metapher die Anzahl der benötigten Schritte vor, um ein besseres Gefühl für die gefahrenen Distanzen zu bekommen.

Drehungen

Um Drehwinkel besser abschätzen zu können, wurden verschiedene Strategien angewandt, mit unterschiedlicher Beliebtheit und Effizienz. Einige Versuchspersonen verfolgten einzelne Orientierungspunkte oder die gesamte Umgebung bei Drehungen mit dem Kopf, den Augen oder dem ausgestreckten Arm (letzteres jedoch nur in Abwesenheit des Experimentators). Dabei zerlegten sie häufig mental die beobachteten und zu drehenden Winkel in 90° , 45° oder 30° -Abschnitte, unterteilten also das FOV von 180° in kleinere Segmente ($\frac{180^\circ}{n}$, $n \in \mathbb{N}$), die eine genauere Winkelabschätzung erlaubten. Diese Strategie wurde als angenehm empfunden und führte im allgemeinen zu guten Resultaten.

Eine andere Strategie bestand darin, die Drehungen selbst in Abschnitte zu zerlegen, also z.B. 45° zu drehen, die Drehung zu stoppen, dann wieder 45° zu drehen etc. Diese Strategie wurde insbesondere bei der Reduzierung des Gesichtsfeldes im FOV-Experiment (s. Kap. 5.4.3) angewandt. Gelegentlich wurde auch eine Kombination der beiden Strategien angewandt.

Bewegungsmodelle

Das Fahrradbewegungsmodell wurde meist als intuitiver angesehen, jedoch nur von denen, die wenig Erfahrung mit interaktiven Computerspielen und im Umgang mit der Computermaus besaßen.

Einige Versuchspersonen empfanden das Mausbewegungsmodell als "einfacher". Als Gründe gaben sie an, daß es weniger anstrengend sei, und daß die Navigation durch die konstante maximale Dreh- und Translationsgeschwindigkeit unkomplizierter sei. Dadurch könne man die benötigte Zeit besser als Winkel- bzw. Längenmaß benutzen. Die Versuchspersonen, die das VR Bike in späteren Experimenten noch öfters benutzten gaben an, daß man mehr Zeit benötige, um sich an das Fahrradbewegungsmodell zu gewöhnen. Nach dieser relativ langen Lernphase sei es ihnen aber dann lieber als das Mausbewegungsmodell.

¹⁴Durch den Leerlauf und die Gangschaltung kamen zusätzliche Unsicherheitsfaktoren hinzu.

Szenarien

Die Versuchspersonen, die ihren ersten experimentellen Block in der Punktlandschaft durchführten, entwickelten eine eher abstrakte, von den Eigenheiten der Umgebung eher unabhängige Strategie, die sie dann auf die realistischeren Umgebungen erfolgreich transferierten. Der Transfer von Strategien von der Stadtumgebung auf die abstrakteren Umgebungen schien schwieriger zu sein, so daß dabei häufiger Strategiewechsel oder -modifikationen auftraten.

Fragebögen zur Präsenz und zu Simulatorkrankheiten

Die Auswertung der Fragebögen zur Präsenz in virtuellen Umgebungen (s. Kap. B.3) lieferten kaum interessante Informationen, da die Antworten eine geringe Sensitivität gegenüber den Versuchsbedingungen widerspiegelten. Wir erwarten jedoch, daß der Vergleich mit anderen Experimenten in unserer Arbeitsgruppe ein aussagekräftiges Gesamtbild ermöglicht.

Bei drei Versuchspersonen mußte das Experiment vorzeitig abgebrochen werden, da sie Anzeichen für Simulatorkrankheit zeigten, wie die Analyse des entsprechenden Fragebogens (s. Abb. B.2) im Anschluß auch bestätigte. Generell war die Tendenz zu Simulatorkrankheiten in der Punktewolke am größten. Versuchspersonen, die anfällig für Simulatorkrankheiten waren, empfanden das Fahrradbewegungsmodell als angenehmer, da Sie dort Beschleunigung und Geschwindigkeit selbst kontrollieren konnten.

Kapitel 6

Allgemeine Diskussion

In der vorliegenden Arbeit untersuchten wir menschlichen Dreiecksvervollständigung in virtuellen Umgebungen. Wir variierten systematisch die Szenerie, das Eingabegerät und den Fortbewegungsmodus sowie das horizontale Gesichtsfeld. Weiter führten wir Szenenwechsel als Paradigma ein, um Piloting und “scene matching” als Homingstrategie auszuschließen.

Im folgenden wollen wir unsere Ergebnisse mit verwandten Studien zur menschlichen Dreiecksvervollständigung vergleichen.

6.1 Bezug zur Dreiecksvervollständigungsliteratur

Insgesamt waren die Homingleistungen der Versuchspersonen sehr gut. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Loomis et al. (1993) zur nichtvisuellen Dreiecksvervollständigung zeigt sich, daß in unserem Hauptexperiment die mittleren Fehler in Distanz- und Winkelantwort um einen Faktor von 4.6 bzw. 15.8 geringer ausfielen. In den Studien von Péruch et al. (1997) zur visuellen Dreiecksvervollständigung sind die Distanz- und Winkelfehler nicht explizit angegeben. Den Graphiken nach zu urteilen liegen sie jedoch über den von Loomis et al. (1993) beobachteten, und sind damit wesentlich größer als die von uns beobachteten Fehler.

Auch im FOV-Experiment lagen die Fehler wesentlich unter den von Loomis et al. (1993) beobachteten Werten. Erst durch die Reduktion des FOV auf 45° und weniger erhöhten sich die Fehler auf ein vergleichbares Niveau. Es zeigte sich in unseren Ergebnissen eine ähnliche, wenngleich schwächere Kompression der Verhaltensantworten und ebenfalls eine Tendenz zum Mittelwert. Die Ähnlichkeit der systematischen Fehler ist bemerkenswert, da zur Navigation unterschiedliche Sinnesmodalitäten verwendet wurden - bei Loomis et al. (1993) ausschließlich propriozeptive und vestibuläre Reize, bei uns primär visuelle Reize.

In beiden Experimenten wurde Piloting als Homingstrategie ausgeschlossen: Bei Loomis et al. (1993) durch das Verbinden der Augen, bei uns durch den Szenenwechsel und in der Punktwolke zusätzlich

durch das Fehlen identifizierbarer Landmarken. Insofern ist die primär visuelle Navigation in der Punktwolke am ehesten mit der nichtvisuellen Navigation bei Loomis et al. (1993) zu vergleichen.

Um die in den Studien von Loomis et al. (1993) auftretenden systematischen Fehler zu interpretieren, entwickelten Fujita et al. (1993) ein “Kodierfehlermodell zur nichtvisuellen Wegvervollständigung” (“encoding-error model of pathway completion without vision”). Dieses Kodierfehlermodell basiert auf vier Axiomen:

1. Die bewegungsbegleitend aufgebaute mentale Repräsentation des Dreiecks genügt den euklidischen Axiomen, ist also trigonometrisch korrekt.
2. Real zurückgelegte Distanzen (Translationen) werden subjektiv durch eine eindeutige Funktion $s_{subj} = f(s_{real})$ kodiert.
3. Reale vorgenommene Richtungsänderungen (Rotationen) werden ebenfalls durch eine eindeutige Funktion $\alpha_{subj} = g(\alpha_{real})$ subjektiv kodiert.
4. Die Bestimmung und Ausführung des Homingpfades geschieht ohne systematischen Fehler.

Das Kodierfehlermodell konnte erfolgreich die Ergebnisse der nichtvisuellen Dreiecksvervollständigungsexperimente von Loomis et al. (1993) erklären, indem es annimmt, daß eine Kompression der Distanzen und Winkel im Kodierungsprozeß der einzige Ursprung systematischer Fehler ist. Für komplexere Pfade als Dreiecke reicht diese Annahme jedoch nicht aus, um die beobachteten systematischen Fehler zu erklären (Fujita et al., 1993). Durch die Analyse der Abhängigkeit der beobachteten systematischen Fehler von der Dreiecksgeometrie konnten Fujita et al. (1993) ein reines Ausführungsfehlermodell (output error model) ausschließen.

Auch Péruch et al. (1997) wandten das Kodierfehlermodell auf ihre Ergebnisse zur visuellen Dreiecksvervollständigung in einer einfachen virtuellen Umgebung an. Die beobachteten systematischen Fehler (Kompression der Verhaltensantwort und generell zu kleine Drehwinkel) ließen sich durch das Kodierfehlermodell erfolgreich beschreiben, jedoch übersahen die Autoren, daß zumindest das vierte Axiom nicht erfüllt war:

In einem Kontrollexperiment in derselben VU waren Versuchspersonen angewiesen, sich nach einer gradlinigen Exkursion zum Ausgangspunkt zurückzudrehen, also eine 180° Kehrtwende auszuführen. Die Versuchspersonen waren nicht in der Lage, um den intendierten Winkel von 180° zu drehen¹. Statt dessen drehten sie lediglich um $150.4^\circ \pm 0.9^\circ$, was einer Unterschätzung der simulierten Eigendrehung um 30° entspricht. Dies stellt einen systematischen Fehler in der Ausführung dar (output error), und verletzt somit das vierte Axiom.

Wir hatten ursprünglich ebenfalls ins Auge gefaßt, das Kodierfehlermodell auf unsere Ergebnisse anzuwenden, um darüber Rückschlüsse über die mentale Repräsentation der Versuchspersonen ziehen

¹Wir unterstellen hier den Versuchspersonen, daß sie wußten, daß eine Kehrtwende einer Drehung um 180° entspricht und auch intendierten, um diesen Winkel von 180° zu drehen.

zu können. Aus folgendem Grund war dies für einige Versuchspersonen nicht sinnvoll, so daß wir komplett darauf verzichteten.

Wir verwendeten in unseren Experimenten stets gleichschenklige Dreiecke ($s_1 = s_2$). Wenn wir annehmen, daß Axiome 1 bis 4 gelten, so wurden gemäß Axiom 2 s_1 und s_2 als gleich lang wahrgenommen, die mentale Repräsentation wäre also wiederum ein gleichschenkliges Dreieck. In jedem euklidischen gleichschenkligen Dreieck gilt $\beta = \frac{180^\circ - \alpha}{2} < 90^\circ$, also gemäß Axiom 1 auch in dem mental repräsentierten Dreieck. Bei einigen Versuchspersonen beobachteten wir jedoch Drehwinkel von weniger als 90° (vgl. Anhang A.1 und A.4), d.h. Innenwinkel $\beta_m > 90^\circ$. Nach Axiom 4 wäre damit auch der mental repräsentierte Innenwinkel $\beta_{internal} > 90^\circ$, was einen Widerspruch darstellt zu der nach Axiomen 1 und 2 deduzierten mentalen Repräsentation eines gleichschenkligen Dreiecks.

Welches der Axiome verletzt wurde, läßt sich daraus jedoch nicht schließen. Nur für die Versuchsperson *betu* (s. Kap. 5.3.5) können wir annehmen, daß Axiom 1 nicht erfüllt war - ein weiterer Grund, das Kodierfehlermodell nicht anzuwenden. Bei derselben Versuchsperson ließ sich kein systematischer output error feststellen.

Um zwischen systematischen Fehlern in der Kodierung ("encoding error") und in der Ausführung ("output error") von Bewegungen unterscheiden zu können, müßten weitere Experiment durchgeführt werden, die jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit gesprengt hätten. Weder ein reines Kodierfehlermodell noch ein reines output error Modell konnte die Gesamtheit unserer Versuchsergebnisse erklären. Nach unserem Kenntnisstand erscheint es zweifelhaft, ob sich das Kodierfehlermodell, das von Fujita et al. (1993) für nichtvisuelle Pfadvervollständigung konzipiert war, überhaupt auf visuelle Navigationsaufgaben anwenden läßt.

6.2 Einfluß der unabhängigen Parameter

Einfluß des Bewegungsmodells

Generell zeigte sich ein erstaunlich geringer Einfluß der unabhängigen Parameter Bewegungsmodell, Szenerie und FOV. Für das Fahrradbewegungsmodell hatten wir erwartet, daß es verglichen mit dem Mausbewegungsmodell zu besseren Distanzschätzungen führen würde, da es zusätzlich zu den vergleichbaren visuellen Reizen auch propriozeptive Information anbot (Muskelanstrengung, Energieaufwand, Pedalumdrehungen etc.). Diese Hypothese konnte nicht bestätigt werden. Statt dessen zeigte sich ein signifikanter Unterschied bezüglich der beobachteten Drehwinkel: Für das Fahrrad war der Drehwinkel im Mittel korrekt, für das Mausinterface hingegen um $8^\circ \pm 1.9^\circ$ zu gering. Generell zeigte sich eine größere Varianz der Distanz- und Winkelantwort für das Fahrradbewegungsmodell.

²Drehwinkel im Sinne von mittlere Drehwinkeln für eine bestimmte Dreiecksgeometrie, meist für $|\alpha| = 30^\circ$. Dies war somit ein systematischer und kein stochastischer Fehler ("Rauschen").

Die Ursache hierfür ist unklar, wir vermuten jedoch, daß das Fahrradbewegungsmodell durch seine höhere Komplexität eine längere Lernphase benötigt als das Mausinterface, wie die Befragung der Versuchspersonen nahelegt.

Das in Experiment 3 eingeführte neue Fahrradbewegungsmodell, welches zusätzlich Rotation ohne gleichzeitige Translation ermöglichte, wurde von allen Versuchspersonen als wesentlich angenehmer empfunden. Diese subjektive Bevorzugung hatte jedoch entgegen unseren Erwartungen ebenfalls keinen erkennbaren Einfluß auf die Homingleistungen.

Einfluß der Szenerie

Auch die Szenerien zeigten einen erstaunlich geringen Einfluß auf die Homingleistungen. Wir hatten erwartet, daß die Homingleistungen in der Stadtumgebung genauer und von geringerer Varianz wären. Die erste Hypothese konnte nicht bestätigt werden, und es zeigt sich lediglich eine Tendenz zu geringeren Varianzen in der Stadtlandschaft.

Einzig signifikanter Effekt war eine geringere Längenkompression in der Punktwolke. Während man in der abstrakt anmutenden Punktwolke auf reine Pfadintegration angewiesen war, bot sich in der Stadtumgebung durch die zahlreichen Landmarken und den klaren, rechtwinkligen Aufbau zusätzlich Piloting an - jedoch nur bis zum nächsten Szenenwechsel. In der Stadtumgebung bewerteten die Versuchspersonen den Szenenwechsel als wesentlich störender als in den reizärmeren Szenerien. Es kann jedoch nur spekuliert werden, ob die Irritation durch den Szenenwechsel dazu führte, daß die zusätzliche Information nicht vorteilhaft genutzt werden konnte.

Die gute Homingleistungen in der Punktwolke belegen, daß bei einem hohen optischen Fluß Pfadintegration in einer rudimentären virtuellen Umgebung möglich ist und zu guten Schätzungen zurückgelegter Distanzen und gedrehter Winkel führt.

Einfluß des horizontalen Gesichtsfeldes

Wir hatten erwartet, daß die Reduktion des FOV in Experiment 4 eine deutliche Verschlechterung der Homingleistungen und eine höhere Variabilität der Verhaltensantworten implizieren würde. Dies konnte bei einigen Versuchspersonen bestätigt werden, bei anderen jedoch nicht. Durch die iterierte Halbierung des FOV vergrößerte sich vor allem die Inkohärenz der Verhaltensantworten, gleichzeitig trat ein Strategiewechsel auf. Alle Versuchspersonen bewerteten Navigation unter dem kleinsten FOV von 11.25° als am schwierigsten. Die Ansichten darüber, welches FOV die einfachste Navigation ermöglichte, variierte zwischen 45° und 180° . Generell wurde die Sichtfeldbegrenzung als Referenzrahmen benutzt, um Drehungen besser abschätzen zu können, vergleichbar mit Autofahrern, die die Sichtfeldbegrenzung der Fensterholme beim Einparken benutzen. Dadurch konnte die Einschränkung des natürlichen nutzbaren Sichtfeldes, die oft als Nachteil vieler VR-Displays angeführt wird, zum Vorteil der Versuchspersonen genutzt werden.

Eine Möglichkeit, die Vorteile eines visuellen Referenzrahmens und eines großen FOV zu vereinen, könnte darin bestehen, im simulierten FOV zusätzliche Referenzmarken einzublenden, etwa in Form eines Linienrasters. Eine andere Möglichkeit, die Orientierungsfähigkeit in VU zu verbessern, ist die Projektion von Koordinatensystemen auf die VU selbst, ähnlich dem Linienraster einer Landkarte (Darken & Sibert, 1996).

Zwischen dem ersten und dem identischen letzten experimentellen Block von Experiment 4 trat eine Verbesserung der Winkelantwort bezüglich Variabilität und Kompression auf, obwohl keinerlei explizite Rückmeldung über die Homingleistungen gegeben wurde. Bei drei von vier Versuchspersonen zeigte sich zudem eine Verbesserung der Distanzfehler, eine fuhr gegen Ende des Experiments zunehmend zu weit. Anscheinend ist Lernen ohne explizite Erfolgskontrolle möglich. Wir vermuten, daß der Lerneffekt im wesentlichen auf einer verbesserten Strategie beruht.

Eine systematische Verzerrung wahrgenommener Distanzen und Richtungen, wie sie z.B. in Psotka, Lewis, & King (1998) und berichtet wurde, konnte in unseren Untersuchungen nicht festgestellt werden. Wir vermuten, daß unser Versuchsaufbau dazu beiträgt, daß die Raumgeometrie unverzerrt wahrgenommen wird: Durch die zylinderförmige Leinwand steht ein horizontaler Sehstrahl stets senkrecht zur Projektionsfläche. Dies könnte eine unverzerrte Raumdarstellung suggerieren. Bei planaren Displays (Computermonitore, Fernseher, planare Projektionsleinwände) zeigte sich hingegen systematische Verzerrungen der Raumwahrnehmung, auch bei übereinstimmendem physikalischem und simuliertem Gesichtsfeld (Psotka & Lewis, 1995). Nicht übereinstimmendes physikalisches und simuliertes Gesichtsfeld wurden bei planaren Displays nicht als irritierend empfunden (Psotka & Lewis, 1995). Bei unserer zylinderförmigen Projektionsleinwand erzeugte dies jedoch eine zunehmende Irritation, wie informelle Umfragen zeigten.

6.3 Piloting versus Pfadintegration

Wie erwartet verbesserten sich durch dem Verzicht auf einen Szenenwechsel in Experiment 2 die Homingleistungen erheblich. Versuchspersonen gaben dort an, ausschließlich landmarkenbasiert zu navigieren. Experimentelle Bestätigung hierfür ergab sich aus den qualitativen Unterschieden zwischen den beobachteten Trajektorien (s. Abb. 5.9).

Der Szenenwechsel erwies sich also als erfolgreiches Paradigma, um den Einfluß von Piloting auf die Navigationsleistung in virtuellen Umgebungen zu untersuchen. Es zeigte sich, daß Piloting subjektiv bevorzugt wurde und stets angewandt wurde, sobald genügend verlässliche Landmarken dargeboten wurden. Dies ist nicht verwunderlich, da Piloting in unserer Versuchsumgebung wesentlich bessere Homingleistungen ermöglichte als Pfadintegration allein.

In den Bedingungen ohne Szenenwechsel war neben Piloting jedoch stets zugleich Pfadintegration möglich. Unter dem verwendeten Versuchsparadigma konnte also Piloting nicht isoliert vom Einfluß der Pfadintegration untersucht werden. Eine Methode, um visuelles Piloting ohne gleichzeitige

Pfadintegration zu untersuchen, könnte darin bestehen, in der Art von Diavorträgen einen kontinuierlichen optischen Fluß zu unterbinden. Die Fortbewegung wäre dann nicht mehr kontinuierlich, sondern diskret. Das visuelle Feedback bestünde aus einzelnen Ansichten aus verschiedenen Positionen, mit dazwischenliegender Dunkelphase, um jeglichen optischen Fluß zu unterbinden. Bewegungsentscheidungen bestünden dann darin, willentlich den nächsten Standpunkt zu bestimmen, ähnlich einer "Teleportation auf Kommando".

Durch den Szenenwechsel wurde also der Einfluß von Piloting *zusätzlich* zur generell möglichen Pfadintegration untersucht. Virtuelle Umgebungen erwiesen sich als geeignete Versuchsumgebung, da sie einen einfachen Szenenwechsel bzw. eine "Teleportation" ermöglichen. In realen Umgebungen sind prinzipiell auch Szenenwechsel denkbar, jedoch lassen sich dabei Sinnesreize, die Information über den Szenenwechsel selbst liefern, nie vollständig ausschließen. So wäre es denkbar, Personen mit verbundenen Augen bzw. in Dunkelheit in eine andere Umgebung zu transportieren. Dabei lassen sich jedoch propriozeptive und insbesondere vestibuläre Reize nie komplett ausschließen. Zudem wäre ein realer Transport durch eine bestimmte Zeitdauer gekennzeichnet, was zusammen mit den vestibulären und propriozeptiven Reizen wiederum Rückschlüsse über zurückgelegte Distanz und ausgeführten Drehwinkel ermöglicht. Dadurch wäre ein räumlicher Bezug zwischen den beiden Szenerien hergestellt, der ja gerade ausgeschlossen werden sollte.

Virtuelle Umgebungen hingegen ermöglichen eine frei Gestaltung der Szenenwechsel und der Szenerien selbst und bieten die Möglichkeit, den Einfluß einzelner Reize und Rauminformationen isoliert zu betrachten. Virtuelle Umgebungen erweisen sich also als geeignetes Versuchsparadigma, um menschliches Navigationsverhalten zu untersuchen. Die Übertragbarkeit der in virtuellen Versuchsumgebungen gewonnenen Ergebnisse³ auf reale Umgebungen ist damit jedoch noch nicht gewährleistet und bedarf weiterer Untersuchung. Dennoch sind die meisten Hinweise auf die Übertragbarkeit positiv, wie wir eingangs in Kapitel 2.4.4 ausgeführt haben.

³Mit "Ergebnissen" meinen wir hier Raumwissen über die Umgebung als auch Wissen über die menschliche Raumkognition.

Anhang A

Detaillierte Darstellung der Versuchsergebnisse

A.1 Beispiele für Trajektorien

Im folgenden sind exemplarisch die beobachteten Trajektorien der Versuchsperson *hege* für zwei experimentelle Blöcke des Hauptexperiments abgebildet. Deutlich erkennbar sind die geschwungenen Trajektorien für das Fahrradbewegungsmodell in Abbildung A.1, verglichen mit den geraden Trajektorien und Drehungen auf der Stelle für das Mausbewegungsmodell in Abbildung A.2. Auffällig ist auch die größere Variabilität im Drehwinkel bei größeren Innenwinkeln α (obere Graphiken). Um die Endpunkte der Trajektorien sind 1σ Vertrauensellipsen gelegt mit Hauptachsen σ_1 und σ_2 (s. Kap. 5.1.2). Siehe Legende in Abbildung 5.1 für eine Erläuterungen der Beschriftung.

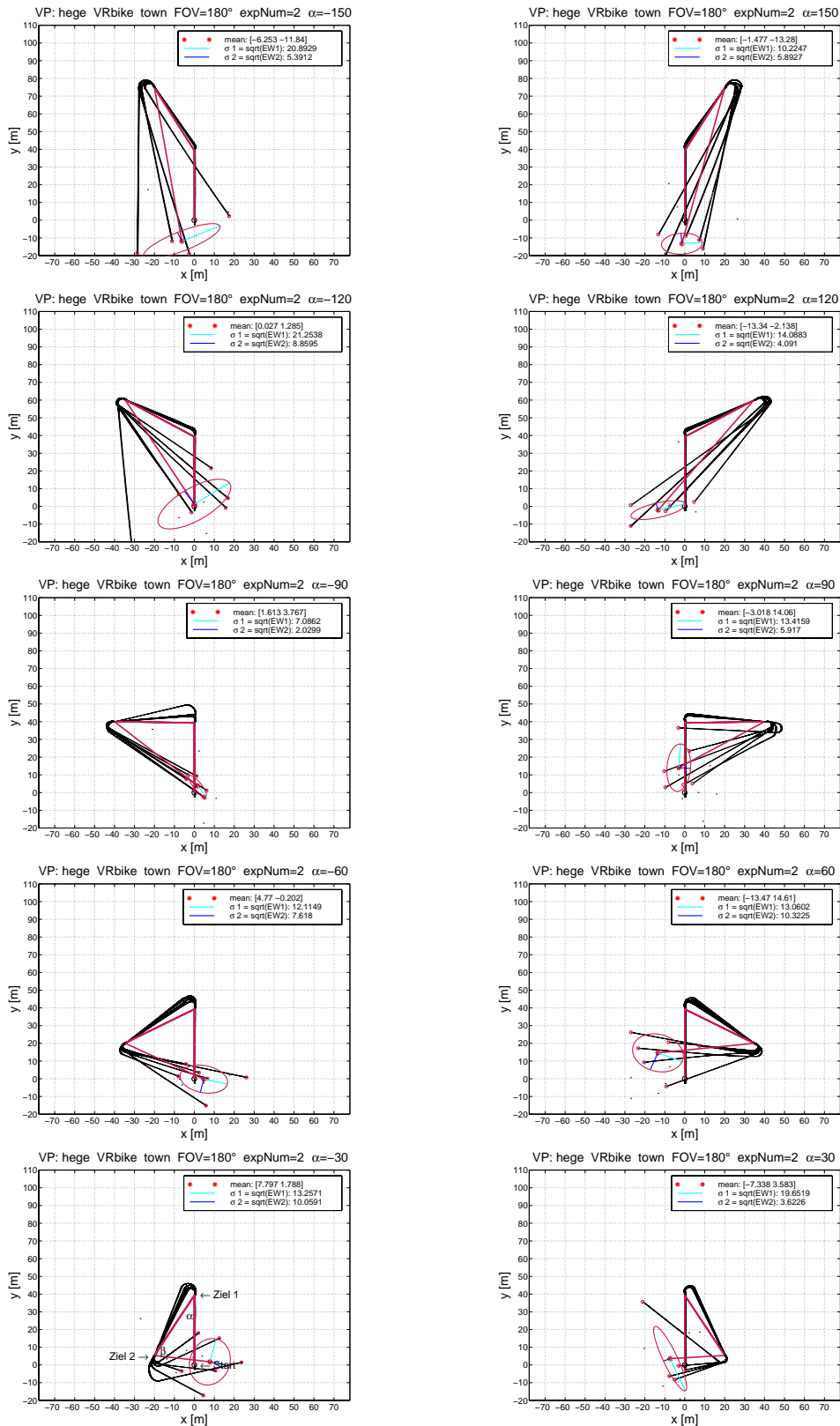


Abbildung A.1: Beispiel für Trajektorien im Dreiecksvervollständigungsexperiment der Versuchsperson *hege* für das Fahrradbewegungsmodell.

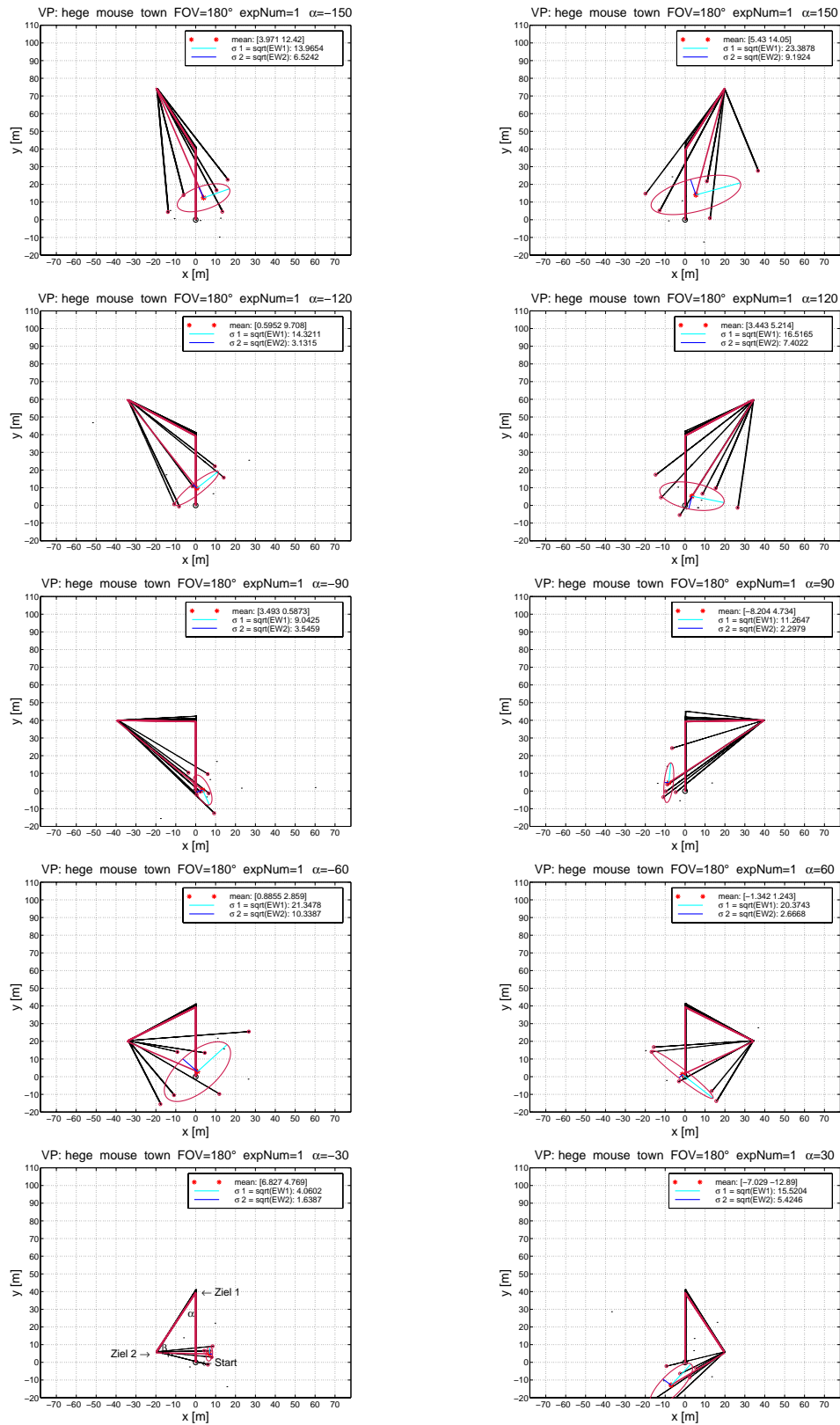


Abbildung A.2: Beispiel für Trajektorien im Dreiecksvervollständigungsexperiment der Versuchsperson *hege* für das Mausebewegungsmodell.

A.2 Verhaltensantworten der Versuchspersonen - Hauptexperiment

Legende für die folgenden Abbildungen

Im folgenden sind je Seite die Verhaltensantworten einer Versuchsperson im Hauptexperiment dargestellt. In Abbildung A.3 bis A.8 sind die Ergebnisse von Versuchspersonen aufgetragen, die in je einer Szenerie Experimente mit beiden Bewegungsmodellen durchgeführt haben (Szenerie-Gruppe). Abbildung A.9 bis A.12 sind die Verhaltensantworten der vier Versuchspersonen, die mit je demselben Bewegungsmodell das Experiment in den drei verschiedenen Umgebungen durchführten (Bewegungsmodell-Gruppe).

- Eingeschlagener Winkel β_m zur Vervollständigung des Dreiecks, aufgetragen über dem korrekten Winkel β_s zwischen zweitem Schenkel s_2 und drittem Schenkel s_{3_s} (untere Graphiken in der Abbildung).
- Zurückgelegte Strecke s_{3_m} (Luftlinie) zur Vervollständigung des Dreiecks, aufgetragen über der korrekten Länge des dritten Schenkels s_{3_s} (obere Graphiken in der Abbildung).

Legende ansonsten wie in Abbildung 5.2, Seite 66.

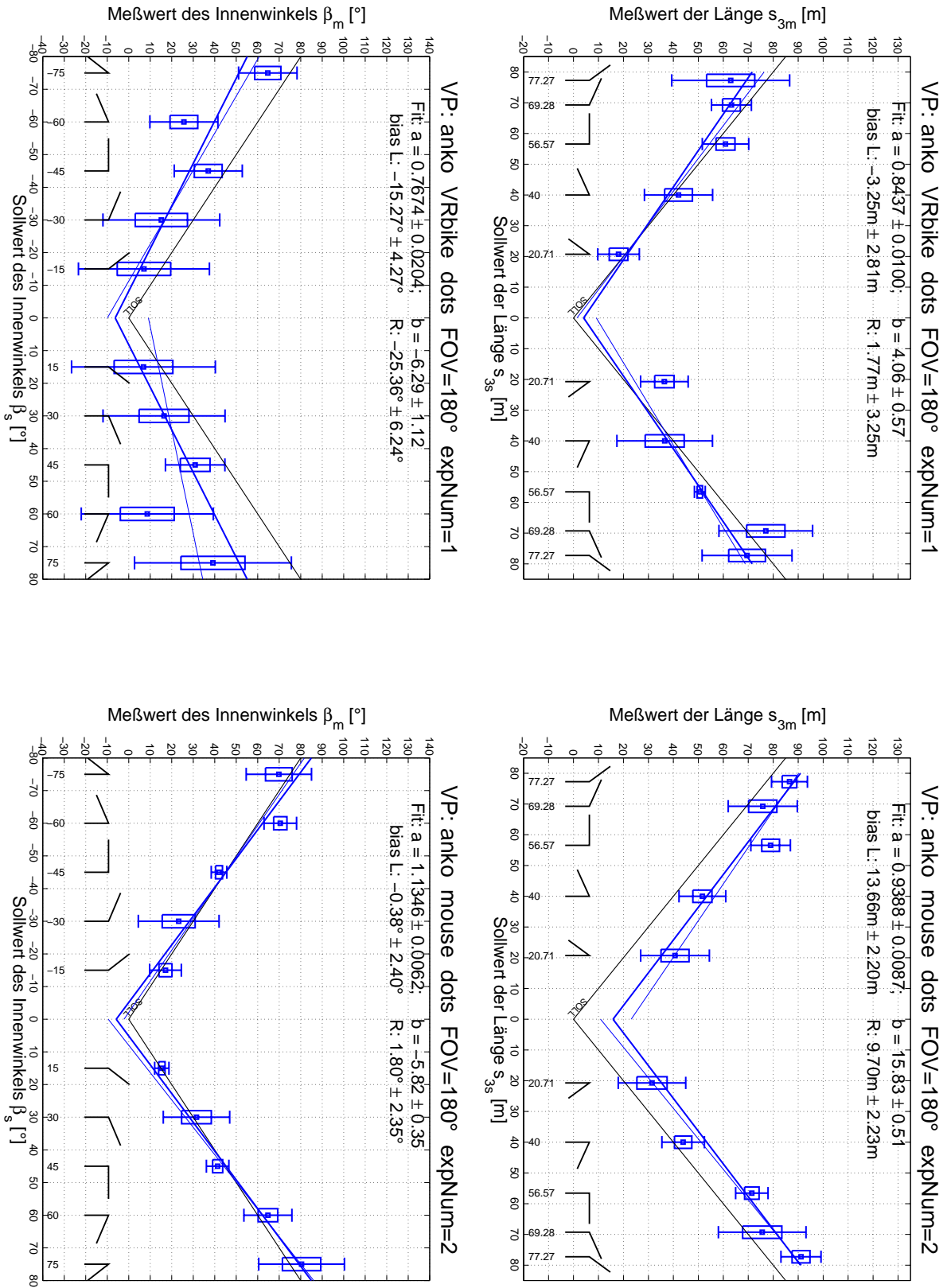


Abbildung A.3: Verhaltensantwort der Versuchsperson *anko* im Hauptexperiment. Auffallend ist die starke Kompression der Winkelantwort im ersten, nicht aber im zweiten Block.

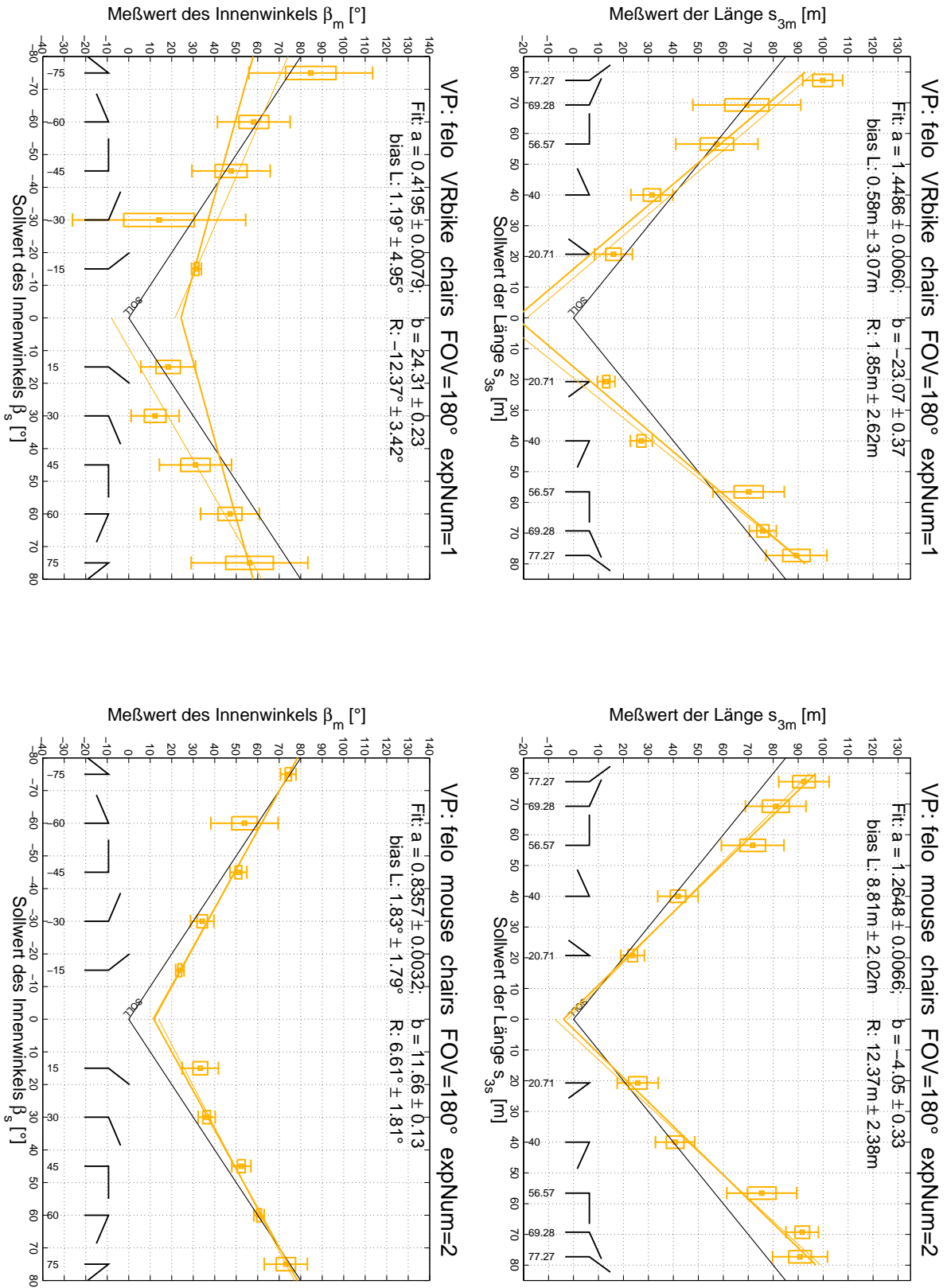


Abbildung A.4: Verhaltensantwort der Versuchsperson *felo* im Hauptexperiment. Auffallend ist die Dekompression der Längenantwort.

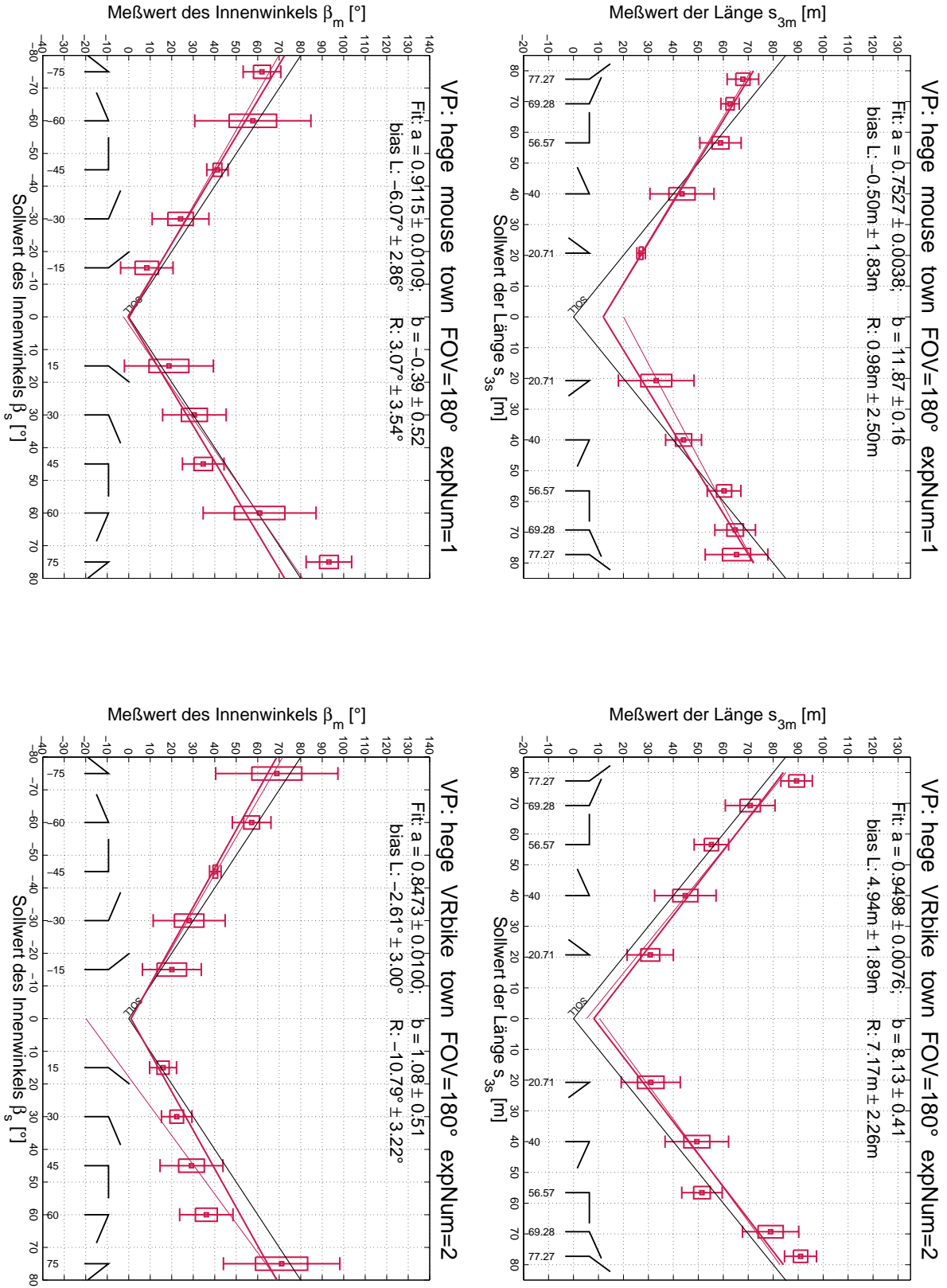


Abbildung A.5: Verhaltensantwort der Versuchsperson *hege* im Hauptexperiment.

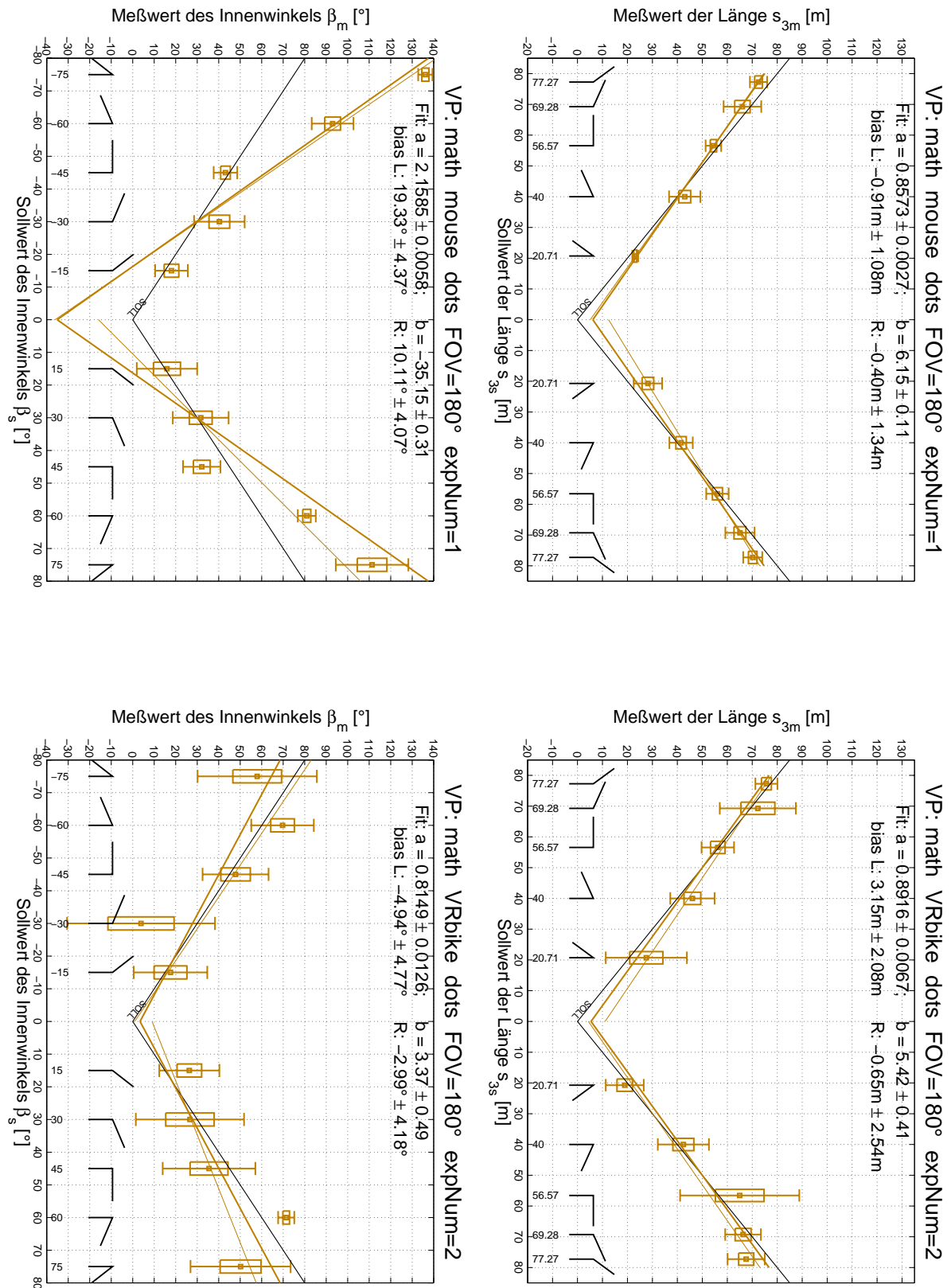


Abbildung A.6: Verhaltensantwort der Versuchsperson *math* im Hauptexperiment. Auffallend ist die inkohärente Winkelantwort im ersten Block.

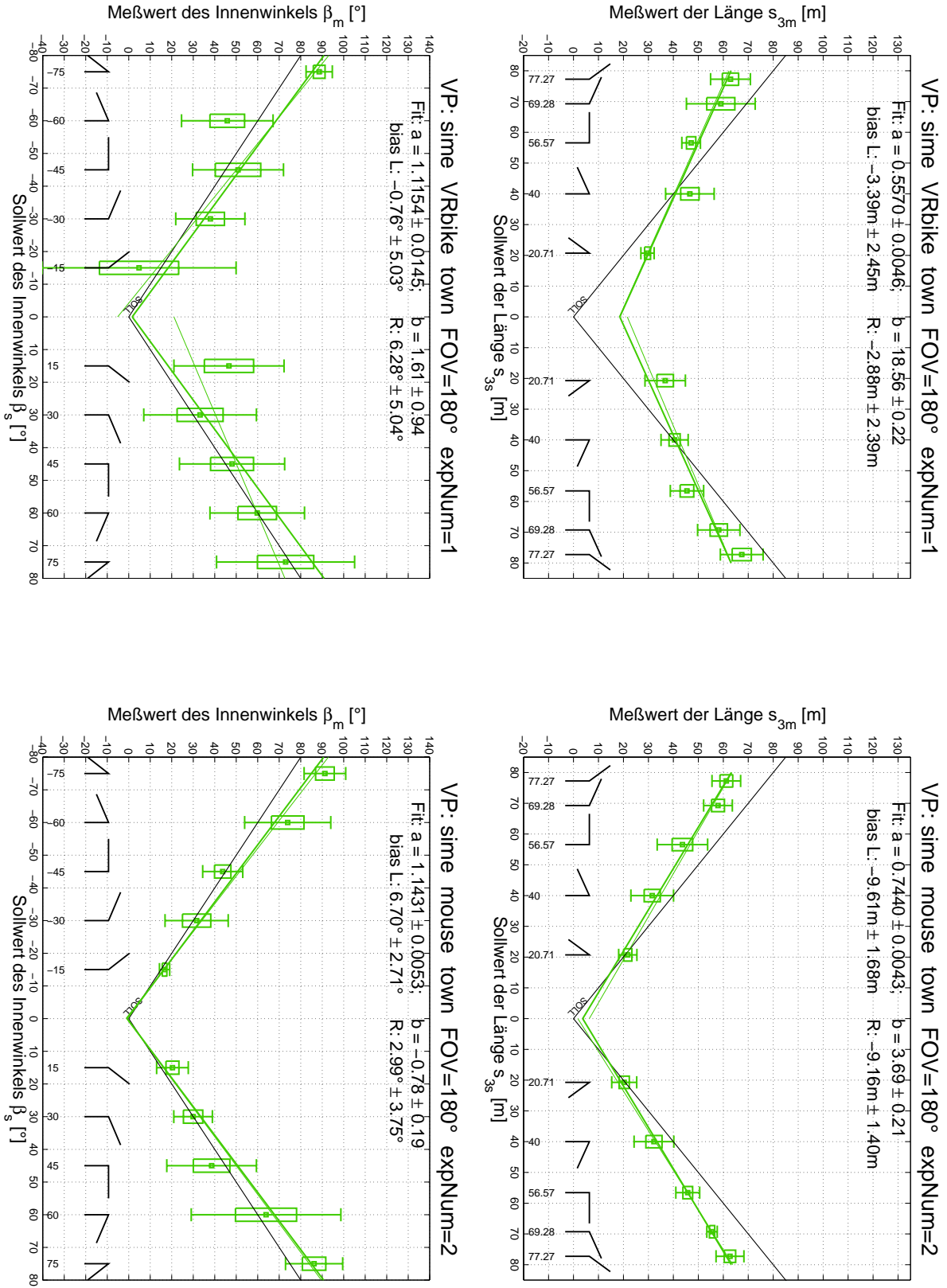


Abbildung A.7: Verhaltensantwort der Versuchsperson *sime* im Hauptexperiment.

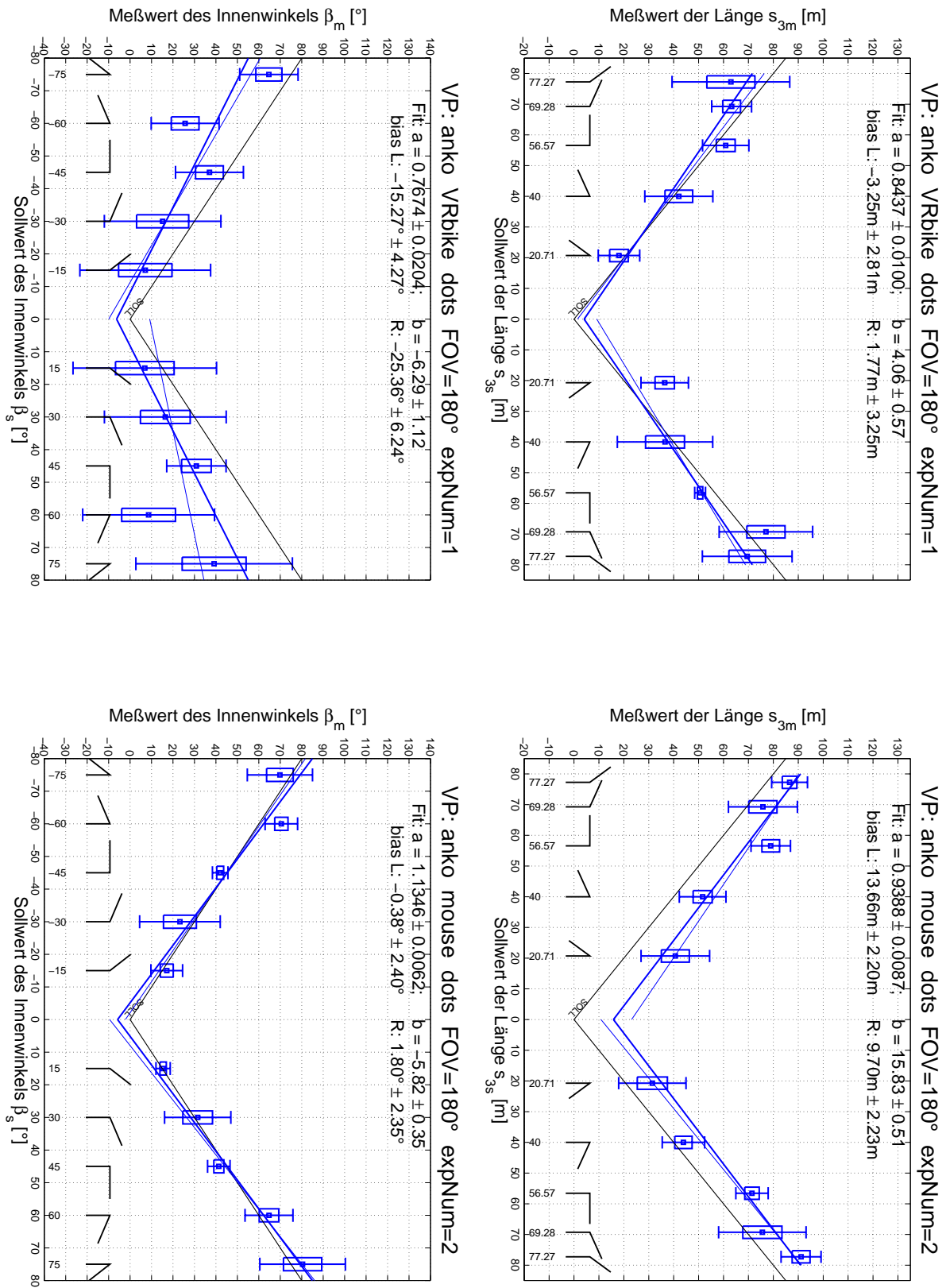


Abbildung A.8: Verhaltensantwort der Versuchsperson *sthe* im Hauptexperiment. Auffallend ist die starke Winkelkompression im ersten, nicht aber im zweiten Block.

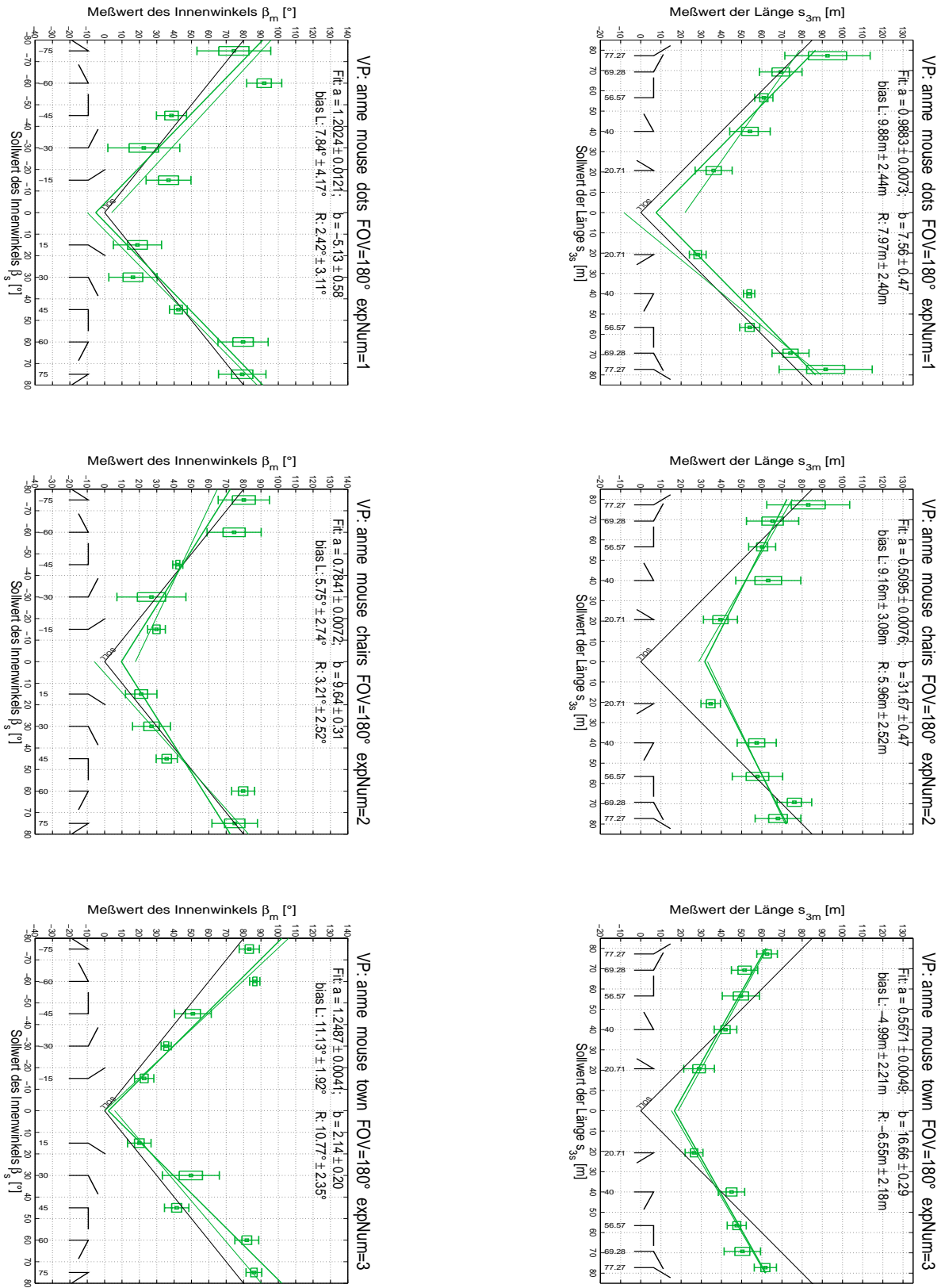


Abbildung A.9: Verhaltensantwort der Versuchsperson *anne* im Hauptexperiment.

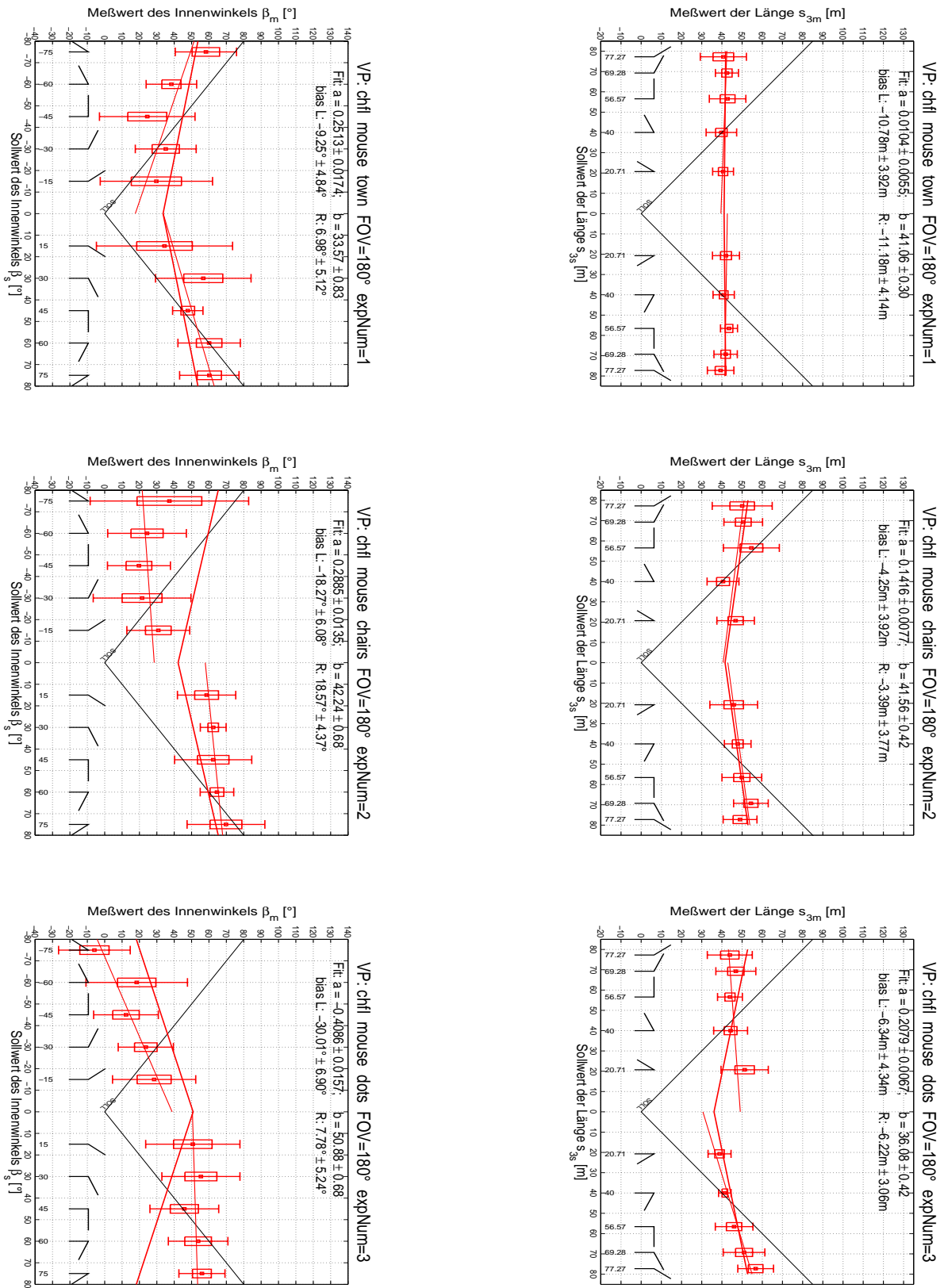


Abbildung A.10: Verhaltensantwort der Versuchsperson *chfl* im Hauptexperiment. Sie zeigt kaum Sensitivität gegenüber den Versuchsbedingungen, bei Rechtsdrehungen drehte sie jedoch tendenziell weiter als bei Linksdrehungen.

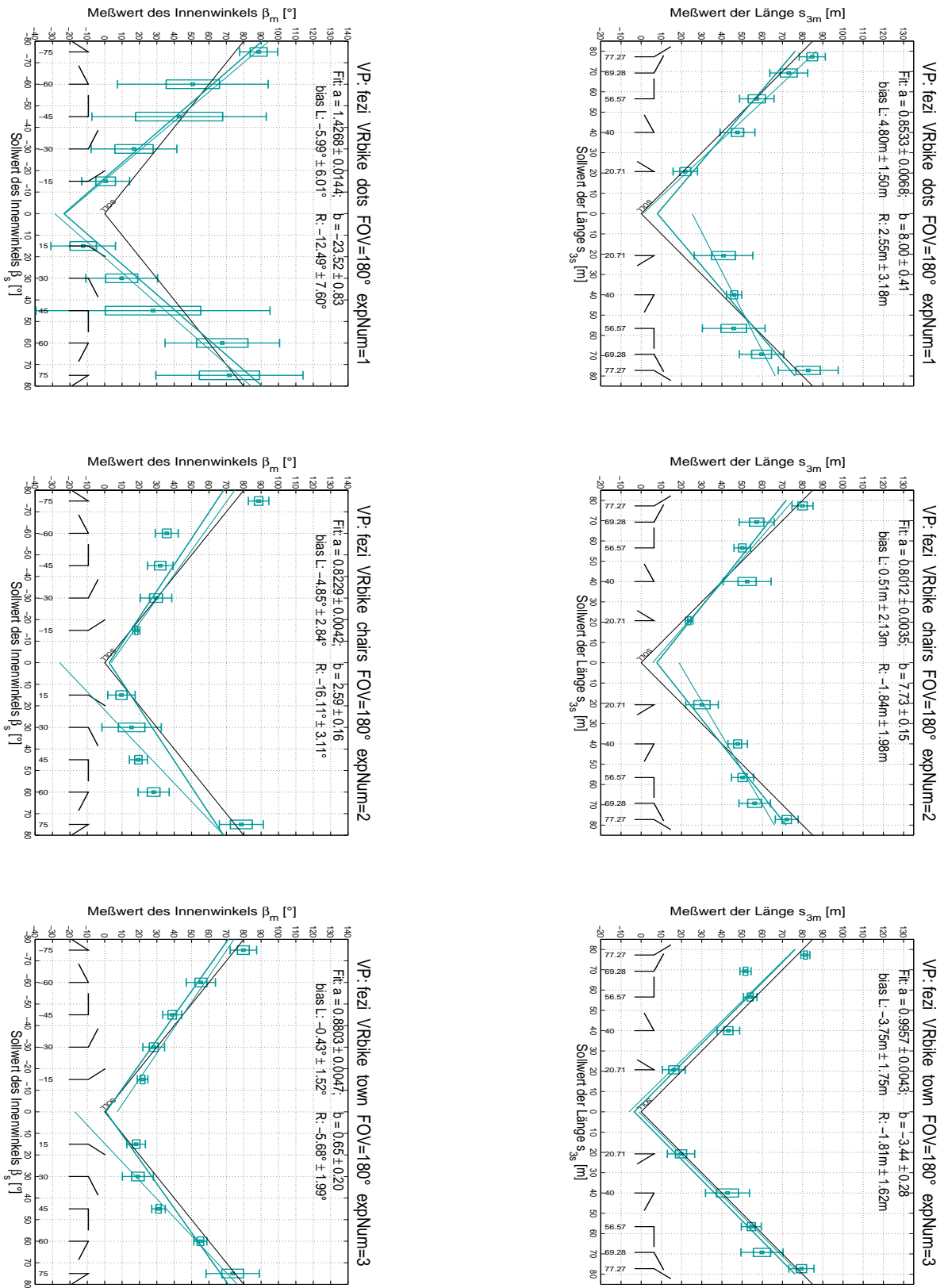


Abbildung A.11: Verhaltensantwort der Versuchsperson *fezi* im Hauptexperiment. Auffallend ist die hohe Varianz der Winkelantwort im ersten Block, die im zweiten und dritten verschwand.

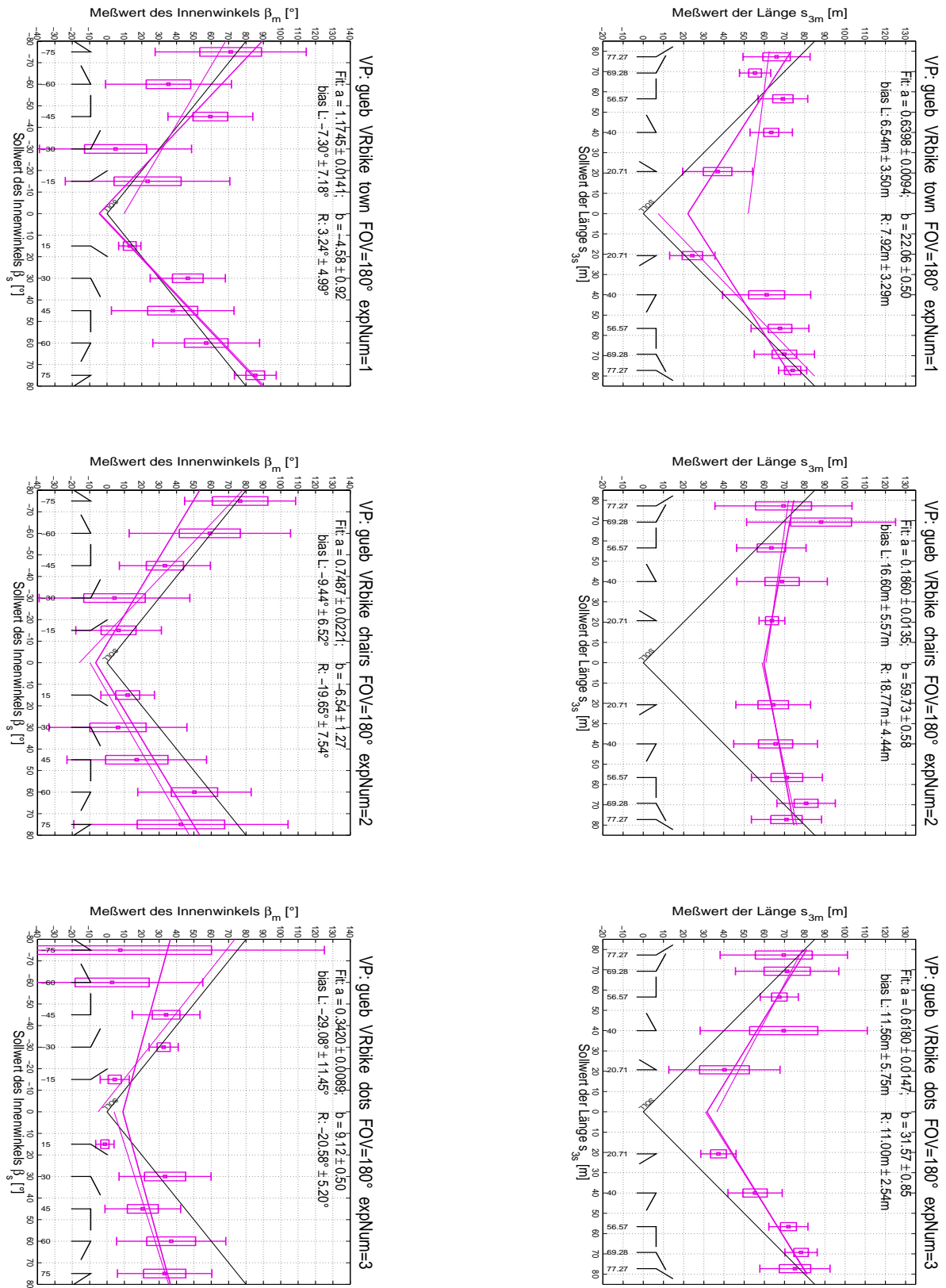


Abbildung A.12: Verhaltensantwort der Versuchsperson *gueb* im Hauptexperiment. In der Stuhllandschaft zeigte sie eine Längenantwort, die von den Versuchsbedingungen weitgehend unabhängig war.

A.3 Ergebnisse von Experiment 3 - Neues Fahrradmodell

Legende wie zuvor.

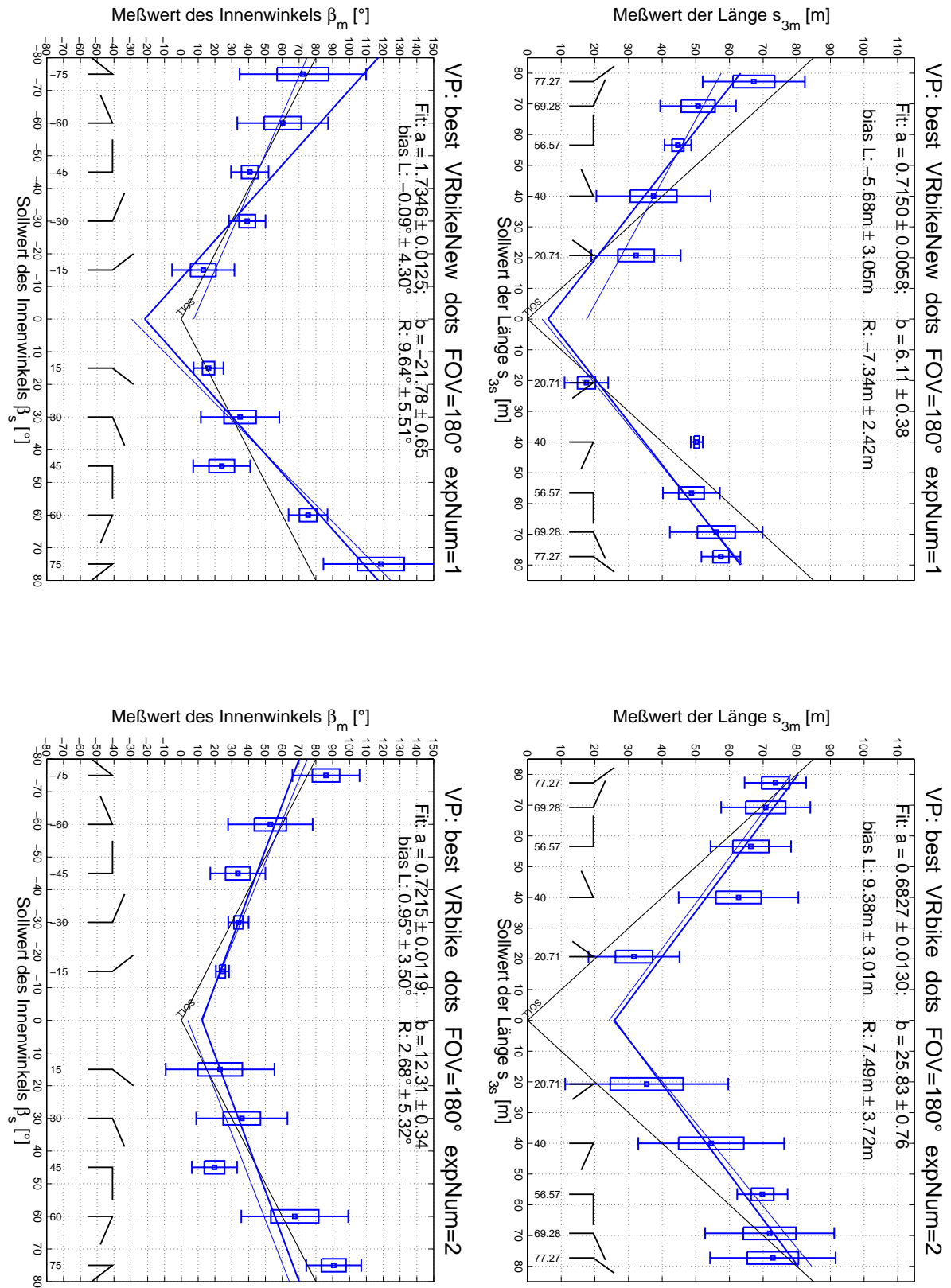


Abbildung A.13: Verhaltensantwort der Versuchsperson *best* in Experiment 3.

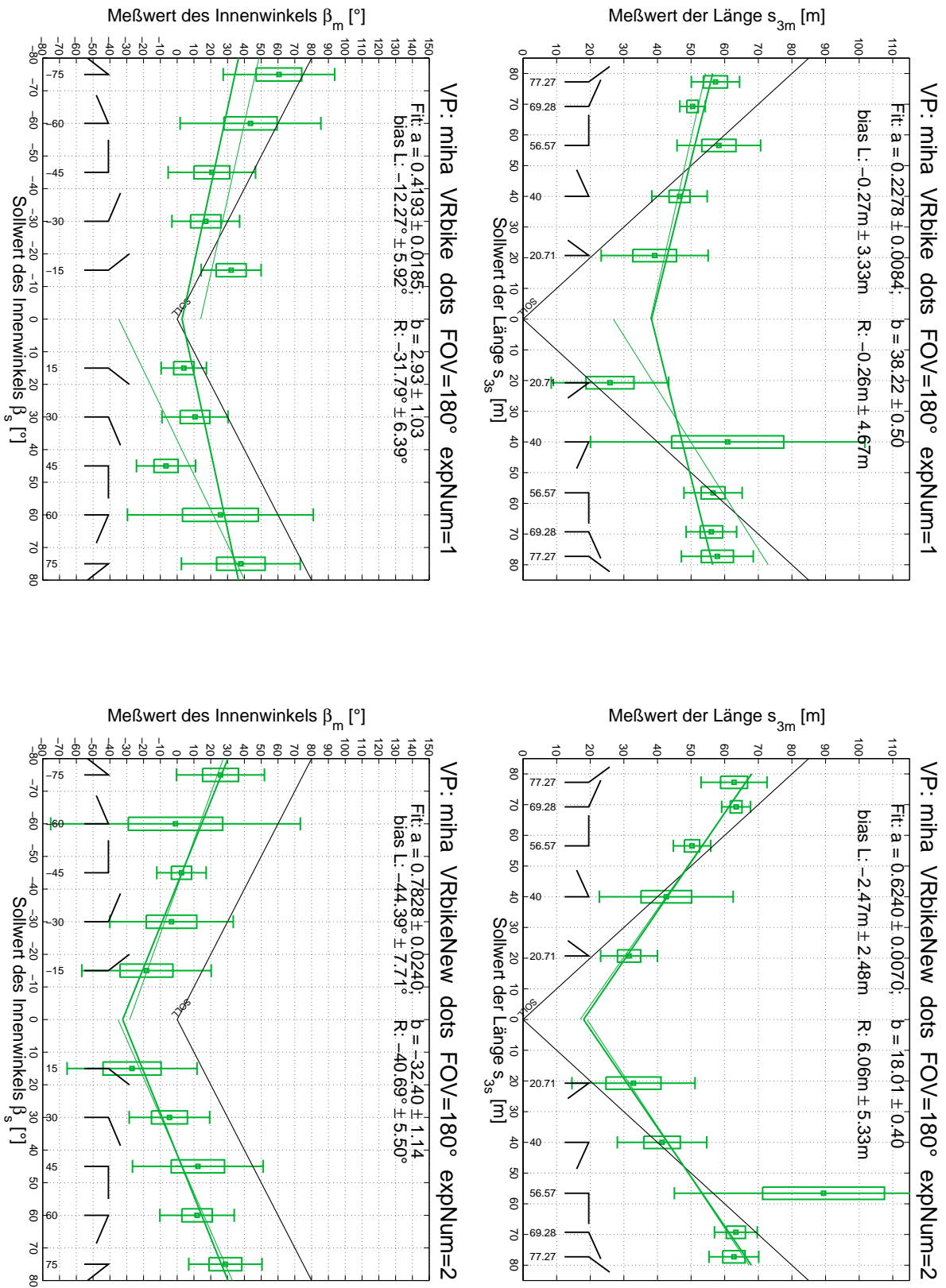


Abbildung A.14: Verhaltensantwort der Versuchsperson *miha* in Experiment 3.

Auffallend ist die geringere Sensitivität von *miha* gegenüber den Versuchsbedingungen, verglichen mit *best*.

A.4 Ergebnisse von Experiment 4 - Variation des FOV

Legende wie zuvor.

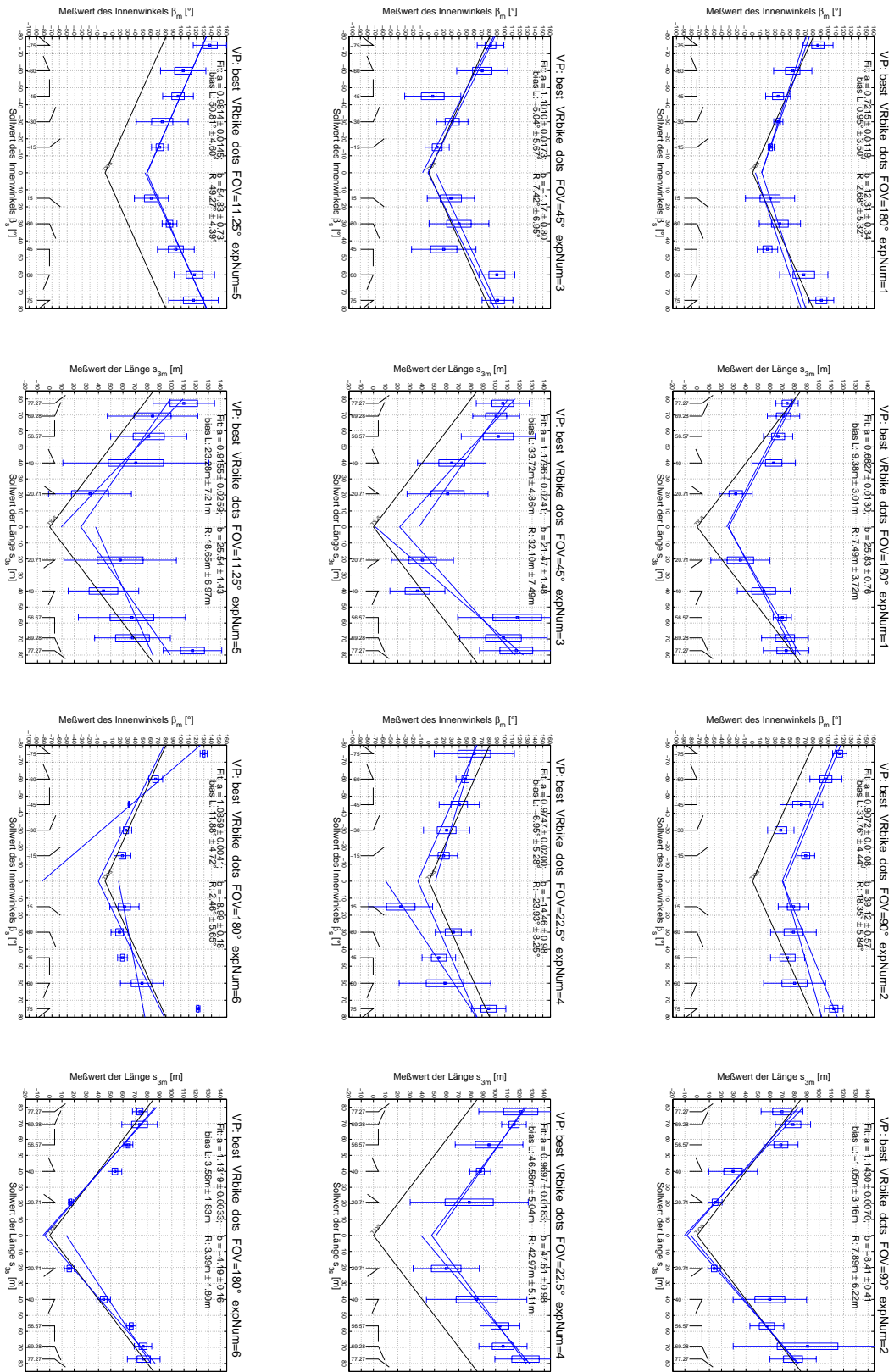


Abbildung A.15: Verhaltensantwort der Versuchsperson *best* im FOV-Experiment.

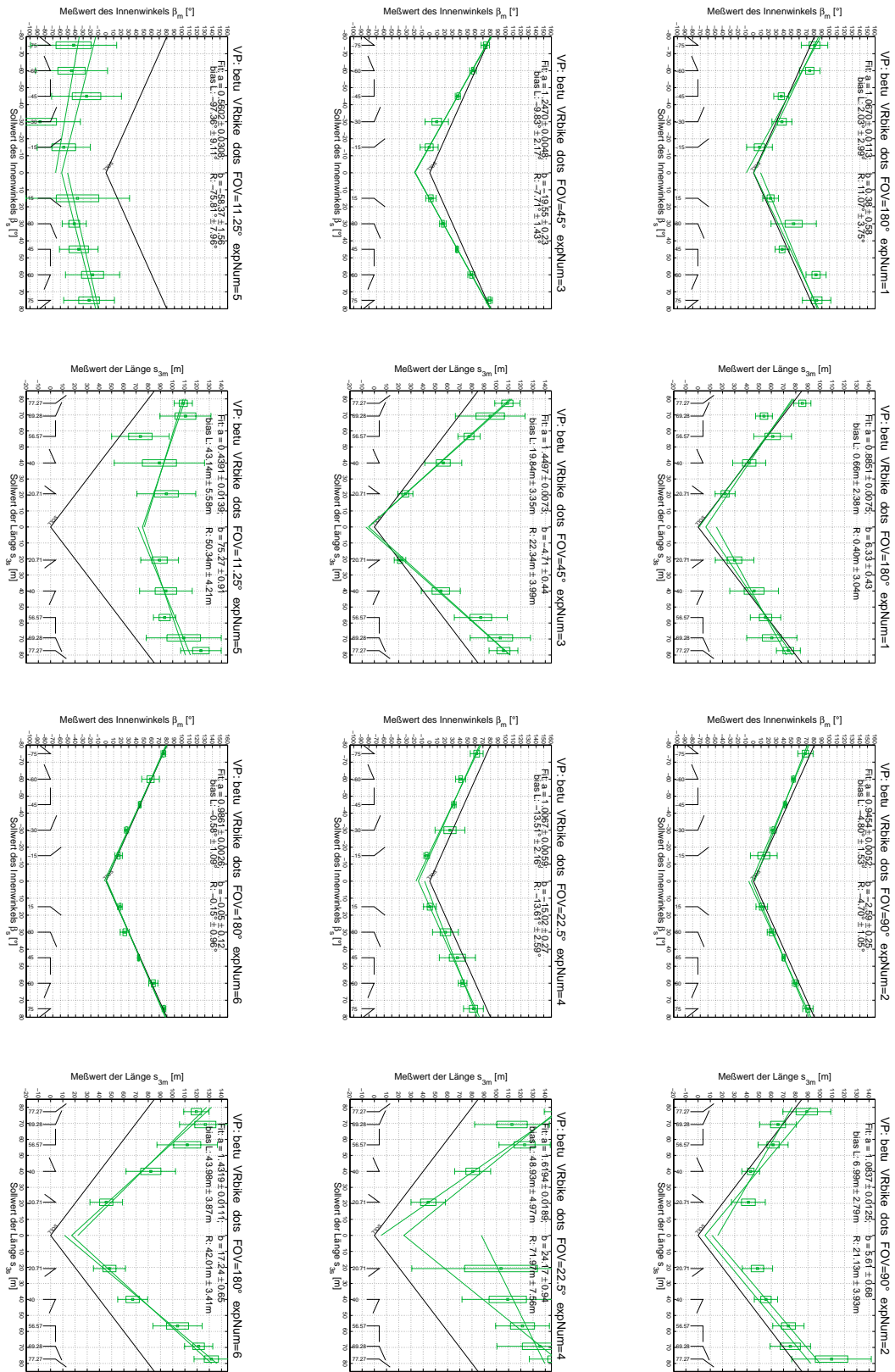


Abbildung A.16: Verhaltensantwort der Versuchsperson *betu* im FOV-Experiment.

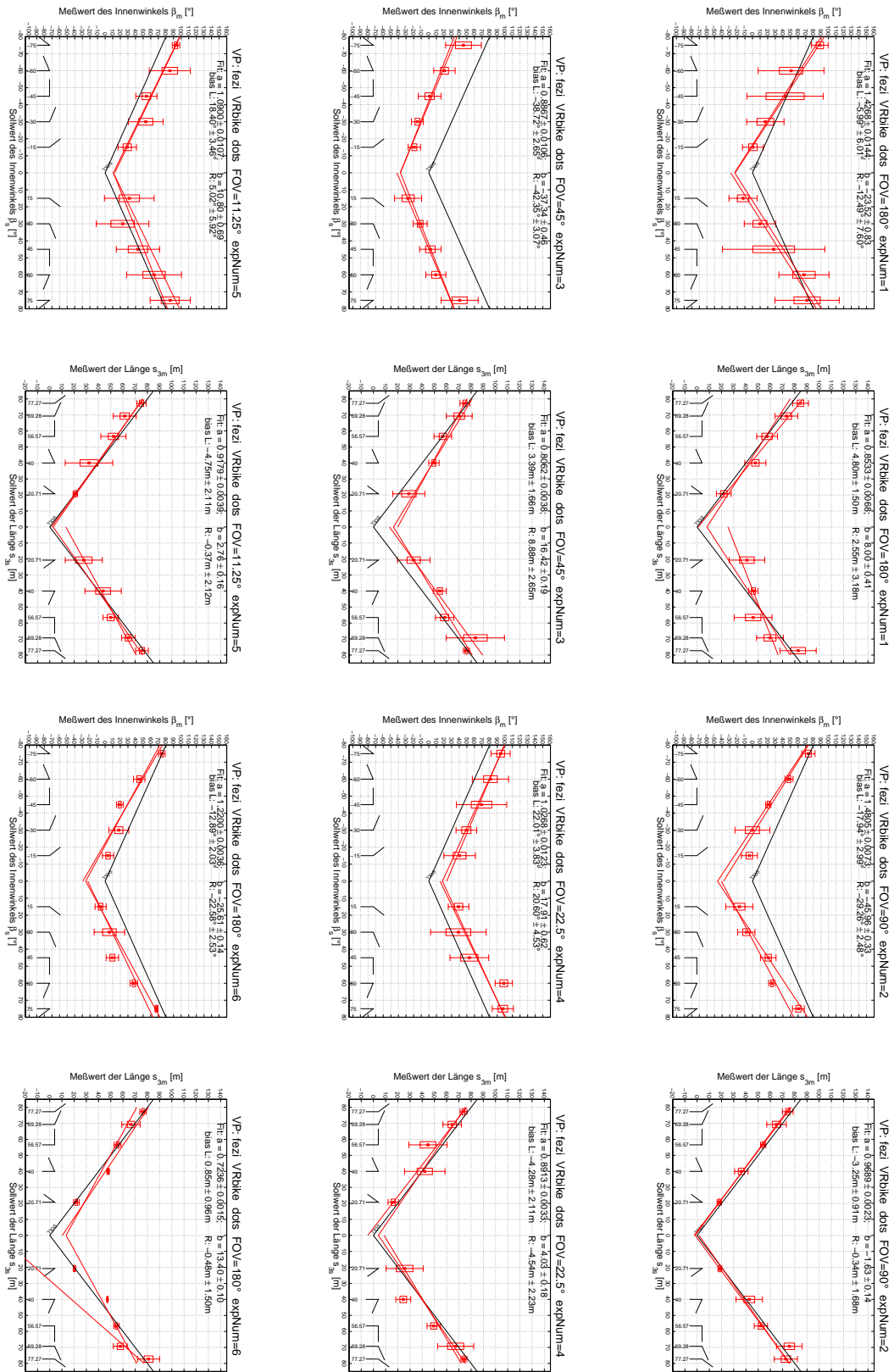


Abbildung A.17: Verhaltensantwort der Versuchsperson fezi im FOV-Experiment.

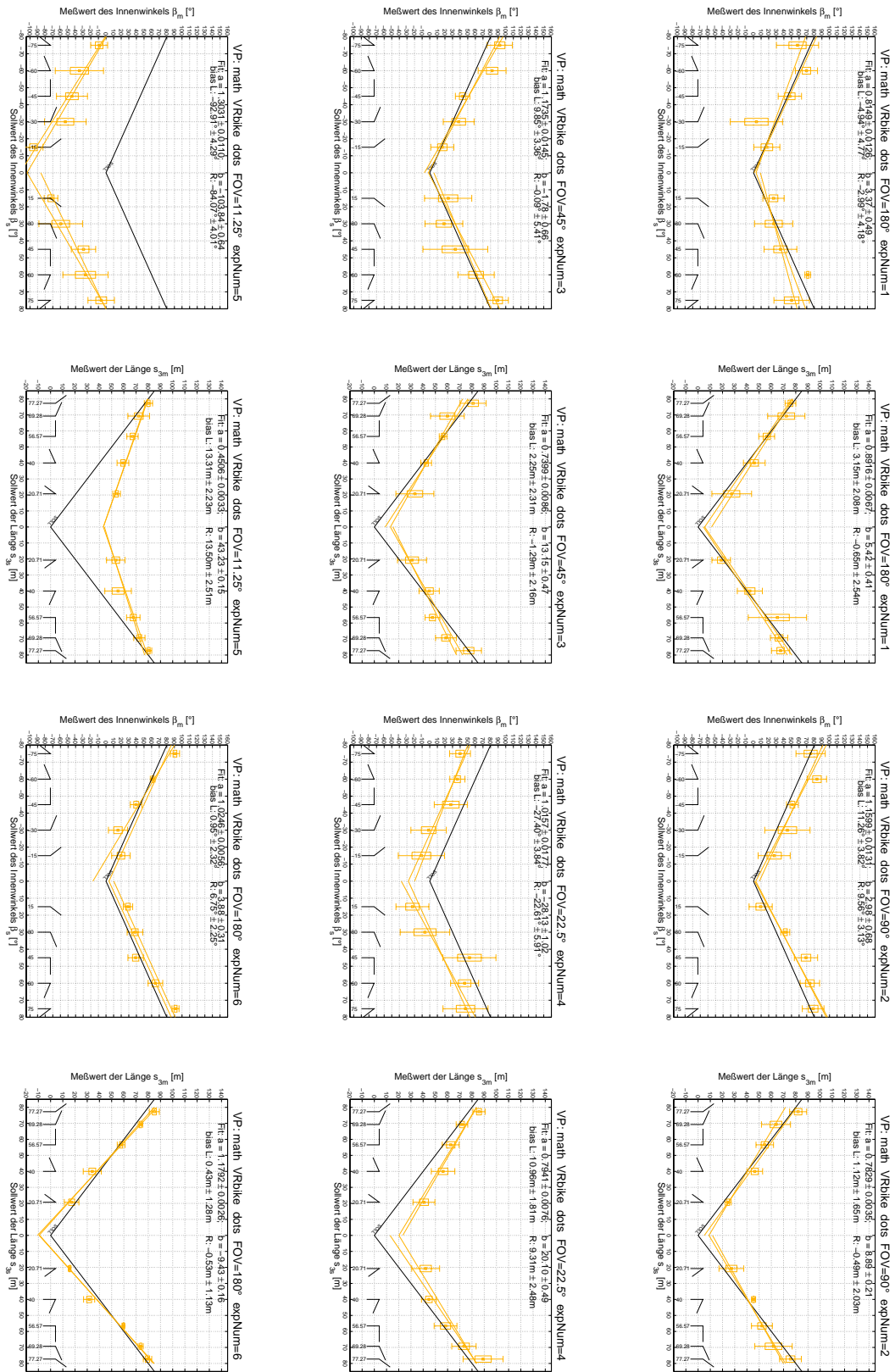


Abbildung A.18: Verhaltensantwort der Versuchsperson *math* im FOV-Experiment.

Anhang B

Versuchsanleitung und Fragebögen

B.1 Versuchsanleitung

Jede Versuchsperson las vor ihrem ersten Experiment die folgende Versuchsanleitung, in welcher der Versuchsablauf und die Eingabegeräte beschrieben sind. Für Rückfragen war der Experimentator während der Trainingsphase anwesend.

Experiment zur Dreiecksvervollständigung (triangle completion experiment)

Anweisungen

Füllen Sie bitte vor und nach dem Experiment die jeweiligen Fragebögen aus. Falls sie während des Experiments irgendwelche Fragen oder Probleme haben, bin ich unter obiger Telefonnummer zu erreichen. Falls ihnen während des Versuches durch die Simulation schlecht werden sollte, brechen Sie bitte sofort das Experiment ab und verlassen Sie den Simulationsraum.

Trainingsphase

In der Trainingsphase haben sie etwa eine halbe Stunde Zeit, sich mit der virtuellen Umgebung, dem experimentellen Aufbau und der Fortbewegungsmethode vertraut zu machen. Währenddessen ist der Experimentator anwesend, um ihnen alles zu Erklären und Fragen zu beantworten. Danach beginnt das eigentliche Experiment, das etwa 50 Minuten dauert.

Experiment

Sie werden in einer virtuellen Umgebung ausgesetzt (s. Rückseite).

1. Bewegen sie sich direkt auf das erste Ziel zu (gelbe Lichtsäule). Sobald sie es erreicht haben (also quasi 'im gelben Lichtkegel stehen'), erscheint das zweite Ziel irgendwo zu ihrer rechten oder linken Seite. Der Text am unteren Bildrand gibt ihnen die Richtung (rechts/links) an.
2. Bewegen sie sich direkt auf das zweite Ziel zu (bläuliche Lichtsäule). Sobald sie es erreicht haben, wird die Szene ausgeblendet, danach in modifizierter Form wieder eingeblendet.
3. Ihre eigentliche Aufgabe ist nun, möglichst genau zum Ausgangspunkt zurückzufinden. Während der Dunkelphase wurden Objekte umgestellt oder die ganze Umgebung ausgetauscht, so daß sie sich nicht an einzelnen Objekten orientieren können. Wenn sie meinen, sie haben ihren Ausgangspunkt erreicht, drücken sie die Leertaste. Danach werden sie wieder in die Ursprüngliche Umgebung gesetzt, jedoch an einen anderen Ausgangspunkt, und die Schritte 1-3 beginnen von vorne.

Das Experiment ist in 6 Gruppen von je 10 Einzelversuchen (Dreiecken) aufgeteilt, zwischen denen Sie eine kurze Verschnaufpause einlegen können.

Für das Experiment ist es nicht wichtig, daß sie möglichst schnell ans Ziel kommen, sondern daß sie **möglichst genau zum Ausgangspunkt zurückkehren. Merken Sie sich hierfür Richtung und Entfernung zum Ausgangspunkt** (sog. home vector oder Heim-Vektor).

Versuchen sie dennoch, zügig zu fahren und nicht zu lange zu Überlegen. (Wir wollen testen, ob Sie Zurückfinden können und nicht, ob Sie gut in Trigonometrie sind ;-)

Bei Fragen oder Unklarheiten auch während des Experiments wenden Sie sich bitte an den Experimentator (Bernhard Riecke, Tel.: 630)

Eingabemedien

Maus

- Tastenbelegung:
Vorwärtsbewegung: mittlere Maustaste
Drehungen: linke bzw. rechte Maustaste für Drehungen nach links bzw. rechts.
- Es gibt jeweils eine kurze Beschleunigungs- bzw. Abbremsphase.

Virtual Bicycle

- Knopfbelegung:

linker Handgriff		rechter Handgriff	
oberer Knopf Start		oberer Knopf digitale Bremse (s. Display)	
linker Knopf nicht belegt	rechter Knopf (weiß) <u>zur Bestätigung (statt</u> <u>Leertaste und 'p'-Ta-</u> <u>ste)</u>	linker Knopf '-' Schalten: kleinerer Gang (s. Display)	rechter Knopf '+' Schalten: größerer Gang (s. Display)

- Lenken läßt es sich am besten über Gewichtsverlagerung des Oberkörpers. Bei hoher Geschwindigkeit kann man (ähnlich wie bei einem realen Fahrrad) nur große Kurven fahren. Je langsamer man fährt, desto engere Kurven kann man fahren. Bei Geschwindigkeiten unter 5 km/h kann man sehr enge Kurven drehen.
- Treten sie bitte nicht mit *zu* großer Kraft (schneller als 25 km/h), das Fahrrad ist sensibel.
- Die Bremse ist digital: Einmal antippen → Abbremsen bis zum Stillstand. Erneutes Antippen → Lösen der Bremse.
- Der Abstand Sitz - Tretlager läßt sich über den Hebel rechts unter dem Sitz individuell anpassen.

Versuchsumgebungen

Punktewolke



Stuhllandschaft



Stadtlandschaft



Sonstiges

- Der Simulationsraum kann über eine Kamera überwacht werden. Wenn sie Bedenken diesbezüglich haben, teilen sie uns diese bitte vor dem Experiment mit.

Abbildung B.2: Versuchsanleitung

B.2 Fragebogen zu Simulatorkrankheiten (Motion Sickness Questionnaire)

Um zu überprüfen, ob die Experimente bei den Versuchspersonen typische Symptome von Simulatorkrankheiten wie Unwohlsein, Gleichgewichtsstörungen und Schwindel hervorruft, füllten sie vor und nach jedem Experiment einen standardisierten Simulatorkrankheits-Fragebogen aus (Kennedy et al., 1992).

SSQ-D

Dieser Fragebogen dient zur Erfassung gegenwärtiger körperlicher Symptome. Das Vorliegen eines Symptoms mit Werten von 1 (leicht) bis 3 (schwer) kennzeichnen. Trifft ein Symptom nicht zu, bitte mit 0 kodieren. Die Daten werden anonym behandelt.

1	Allgemeines Unbehagen/Unwohlsein	
2	Ermüdung	
3	Kopfschmerzen	
4	Überanstrengte Augen	
5	Schwierigkeiten mit Sehschärfe	
6	Erhöhter Speichelfluß	
7	Schwitzen	
8	Übelkeit	
9	Konzentrationschwierigkeiten	
10	Druckgefühl im Kopfbereich	
11	Verschwommene Sicht	
12	Schwindel (bei geöffneten Augen)	
13	Schwindel (bei geschlossenen Augen)	
14	Gleichgewichtsstörungen	
15	Magenbeschwerden	
16	Aufstoßen	

Namenskürzel

N (1,6,7,8,9,15,16) : 9,54
O (1,2,3,4,5,9,11) : 7,38
D (5,8,10,11,12,13,14) : 13,92
TS : 3,74

SSQ-D nach Kennedy, Lane, Lilienthal, Berbaum & Hettinger

SSQ-D

Dieser Fragebogen dient der Erfassung von gegenwärtigen körperlichen Symptomen. Das Vorliegen eines Symptoms bitte mit Werten von 1 (leicht) bis 3 (schwer) kennzeichnen. Trifft ein Symptom nicht zu, bitte mit 0 kodieren. Die Daten werden anonym behandelt.

1	Allgemeines Unbehagen/Unwohlsein	
2	Ermüdung	
3	Kopfschmerzen	
4	Überanstrengte Augen	
5	Schwierigkeiten mit Sehschärfe	
6	Erhöhter Speichelfuß	
7	Schwitzen	
8	Übelkeit	
9	Konzentrationschwierigkeiten	
10	Druckgefühl im Kopfbereich	
11	Verschwommene Sicht	
12	Schwindel (bei geöffneten Augen)	
13	Schwindel (bei geschlossenen Augen)	
14	Gleichgewichtsstörungen	
15	Magenbeschwerden	
16	Aufstoßen	

Namenskürzel

N (1,6,7,8,9,15,16) : 9,54
O (1,2,3,4,5,9,11) : 7,38
D (5,8,10,11,12,13,14) : 13,92
TS : 3,74

SSQ-D nach Kennedy, Lane, Lilienthal, Berbaum & Hettinger

Abbildung B.3: Fragebogen zu Simulatorkrankheiten (Motion Sickness Questionnaire)

B.3 Fragebogen zur “Präsenz” (Presence Questionnaire)

Um den Einfluß höherer kognitiver Prozesse (wie Bewegungswahrnehmung, Vergessen der Außenwelt etc.) zu untersuchen, füllten die Versuchspersonen nach jedem Experiment einen standardisierten Fragebogen zur Präsenz in der Virtuellen Umgebung aus (Singer et al., 1997).

PQ
(Witmer & Singer, Versus 3.0, Nov. 1994)

Beschreiben Sie Ihre Erfahrung in dieser Umgebung. Kreuzen Sie das geeignete Kästchen, in Übereinstimmung mit der Frage und der Beschäftigung, der sieben-Punkt Skala an. Bitte verwenden Sie die gesamte Skala, wie sich die dazwischenliegenden Stufen eignen. Beantworten Sie die Fragen unabhängig von der Reihenfolge in der sie erscheinen. Überspringen Sie bitte keine Fragen oder kehren zu einer vorhergegangenen Frage zurück, um die Antwort zu ändern.

In Bezug auf die wahrgenommene Umgebung

1. Wie sehr waren Sie in der Lage, die Ereignisse zu kontrollieren?

überhaupt nicht	hin und wieder			vollständig

2. Wie ausprechbar war die Umgebung bei Aktionen, die Sie ausgelöst oder ausgeführt haben?

keine Antwort	moderate Antwort			vollständig Antwort

3. Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der Umgebung?

extrem künstlich	grenzwertig			vollständig natürlich

4. Wie sehr haben die visuellen Aspekte der Umgebung Sie miteinbezogen?

überhaupt nicht	hin und wieder			vollständig

6. Wie natürlich war der Mechanismus, der die Bewegung durch die Umgebung kontrollierte?

extrem künstlich	grenzwertig			vollständig natürlich

7. Wie überzeugend war die Wahrnehmung der Objekte, die sich durch den Raum bewegen?

überhaupt nicht	mäßig überzeugend			sehr überzeugend

8. Wie sehr stimmten Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung mit Ihren Erfahrungen der realen Welt überein?

überhaupt nicht	hin und wieder			vollständig

9. Waren Sie in der Lage vorherzusehen, was als nächstes passieren würde als Reaktion auf die Aktion, die Sie ausgeführt haben?

nicht konsistent	mäßig konsistent			sehr konsistent

10. Wie sehr waren sie in der Lage, aktiv die Umgebung visuell zu überblicken oder abzuschätzen?

überhaupt nicht	hin und wieder			vollständig

14. Wie überzeugend war Ihre Bewegungswahrnehmung innerhalb der virtuellen Welt?

überhaupt nicht	mäßig überzeugend			sehr überzeugend

15. Wie nahe konnten Sie Objekte untersuchen?

überhaupt nicht	ziemlich nahe			sehr nahe

16. Wie gut konnten Sie Objekte von verschiedenen Blickpunkten untersuchen?

überhaupt nicht	hin und wieder			vollständig

18. Wie sehr waren Sie einbezogen in die Erfahrung der virtuellen Welt?

überhaupt nicht einbezogen	ein bisschen einbezogen			vollständig einbezogen

19. Wieviel Verzögerung haben Sie zwischen Ihrer Handlung und dem erwarteten Ergebnis wahrgenommen?

keine Verzögerung	mäßige Verzögerung			lange Verzögerung

Abbildung B.4: Fragebogen zur "Präsenz" (Presence Questionnaire), nach Singer et al. (1997).

20. Wie schnell haben Sie sich an den Umgang mit der virtuellen Umgebung gewöhnt?

überhaupt nicht	langsam						weniger als eine Minute
-----------------	---------	--	--	--	--	--	-------------------------

21. Wie kompetent fühlten Sie sich beim Bewegen und Handeln in der virtuellen Umgebung am Ende des Experimentes?

nicht kompetent	angemessen kompetent						sehr kompetent
-----------------	----------------------	--	--	--	--	--	----------------

22. Wie sehr störte Sie oder lenkte Sie das visuelle Display von der zugewiesenen Aufgabe oder notwendige Aktivitäten ab?

überhaupt nicht	störte etwas						verhinderte die Ausführung der Aufgabe
-----------------	--------------	--	--	--	--	--	--

23. Wie sehr störten die Kontrollgeräte die Ausführung der zugewiesenen Aufgabe und anderer Aktivitäten?

überhaupt nicht	störte etwas						störte sehr
-----------------	--------------	--	--	--	--	--	-------------

24. Wie gut konnten Sie sich auf die zugewiesenen Aufgabe oder die notwendigen Aktivitäten konzentrieren im Vergleich zu den Mechanismen, die verwendet wurden, um diese Aufgabe oder Aktivitäten auszuführen?

überhaupt nicht	hin und wieder						vollständig
-----------------	----------------	--	--	--	--	--	-------------

25. Wie vollständig waren Ihre Sinne in diesem Experiment beansprucht?

überhaupt nicht beansprucht	mittelmäßig beansprucht						vollständig beansprucht
-----------------------------	-------------------------	--	--	--	--	--	-------------------------

26. In welchem Ausmaß haben Sie außerhalb der virtuellen Umgebung vor kommende Ereignisse abgelenkt von Ihrer Beschäftigung in der virtuellen Umgebung?

überhaupt nicht	mäßig beansprucht						sehr arg beansprucht
-----------------	-------------------	--	--	--	--	--	----------------------

27. Wie sehr haben Sie sich, während des gesamten Experiments, auf die Verwendung des Displays und der Kontrollgeräte konzentriert statt auf die virtuelle Umgebung und die experimentelle Aufgabe?

überhaupt nicht	manchmal						sehr oft
-----------------	----------	--	--	--	--	--	----------

28. Wären sie so sehr in die experimentelle Aufgabe miteinbezogen, daß Sie Ihr Zeitgefühl verloren?

überhaupt nicht	hin und wieder						vollständig
-----------------	----------------	--	--	--	--	--	-------------

29. Wie einfach war es, Objekte durch ihre physikalische Wechselwirkung zu erkennen, wie z.B. Berührung eines Objektes, Laufen über eine Oberfläche oder Kollision mit einer Mauer oder einem Objekt.

unmöglich	mittelmäßig schwer						sehr einfach
-----------	--------------------	--	--	--	--	--	--------------

30. Gab es Momente während der Erfahrung in der virtuellen Umgebung, in denen Sie sich völlig auf die Aufgabe oder die Umgebung konzentrierten?

keine	zeitweise						häufig
-------	-----------	--	--	--	--	--	--------

31. Wie einfach konnten Sie sich an die Kontrollgeräte gewöhnen, die zur Wechselschaltung mit der virtuellen Umgebung verwendet wurden?

schwer	mäßig						leicht
--------	-------	--	--	--	--	--	--------

32. Waren die Informationen, der verschiedenen Sinne (z.B. Sehen, Hören, Fühlen) in der virtuellen Umgebung einheitslich?

nicht einheitslich	etwas einheitslich						sehr einheitslich
--------------------	--------------------	--	--	--	--	--	-------------------

Abbildung B.5: Fragebogen zur "Präsenz" (Presence Questionnaire), nach Singer et al. (1997).

B.4 Fragebogen zum Experiment

Im Anschluß an letzten experimentellen Block füllte jede Versuchsperson einen von uns entwickelten Fragebogen aus, in dem unter anderem nach verwendeten Strategien und einer Beurteilung des Experiments gefragt wurde.

Liebe Versuchsperson, bitte beantworten Sie die folgenden Fragen. Falls die Fragestellungen unklar sind, fragen Sie bitte nach.

Zur Person

- Datum und Namenskürzel?
- Alter?
- Schule / Studium (Fächer) / Beruf... ?
- Links/Rechtshänder?

Computererfahrung

- Wie oft arbeiten Sie am Computer (bitte auf der Skala ankreuzen)?

täglich	wöchentlich	monatlich	selten	überhaupt nicht
---------	-------------	-----------	--------	-----------------

- Wie oft spielen Sie interaktive Computerspiele?

täglich	wöchentlich	monatlich	selten	überhaupt nicht
---------	-------------	-----------	--------	-----------------

Navigationsvermögen

- Wie beurteilen Sie allgemein ihre Fähigkeit, sich in normalen Umgebungen zurechtzufinden?

schlecht	okay	gut
----------	------	-----

- Wie beurteilen Sie nach dem Versuch ihr Navigationsvermögen in der Versuchsumgebung?

schlecht	okay	gut
----------	------	-----

Aufgabenstellung

- Wie schwierig fanden Sie die Aufgabe?

schwierig	okay	einfach
-----------	------	---------

Wie beurteilen Sie die Trainingsphase?

zu kurz	genau richtig	zu lang
---------	---------------	---------

unnötig	okay	hilfreich
---------	------	-----------

Strategien

- Haben Sie irgendwelche Strategien benutzt, um zum Ausgangspunkt zurückzufinden?

Ja Nein

Wenn ja:

- Welche? Bitte versuchen Sie diese in Worte/Skizzen zu fassen. (Z.B., wie haben sie Winkel und Distanzen abgeschätzt?)

Abbildung B.6: Fragebogen zum Experiment

- Wie hilfreich waren diese Strategien?

überhaupt nicht

ein bißchen

sehr hilfreich

- Mit welcher Strategie kamen Sie am besten zurecht und weshalb?
- Hatten sie eine mentale Vorstellung der Umgebung/des Dreiecks? Wie sah diese aus?

Virtuelle Umgebung

- Was haben Sie am meisten vermißt in der virtuellen Umgebung?
- Was würden Sie verändern/Was hätten Sie gerne (anders)?
- Wie könnte man die Trainingsphase weiter verbessern?
- Wie beurteilen Sie die verschiedenen Versuchsbedingungen?
(Fahrrad \leftrightarrow Maus bzw. Punktwolke \leftrightarrow Stuhlszenarie \leftrightarrow Stadt bzw. verschiedene Fahrradbedingungen)
- Welche Bedingung empfanden Sie als einfacher (so es einen Unterschied gab)?
- Inwiefern/weshalb?

Fühlten Sie sich desorientiert? Ja Nein

Wenn ja: In welcher Versuchsumgebung war die Desorientierung am größten?

Sonstige Kommentare

Abbildung B.7: Fragebogen zum Experiment

Anhang C

Erklärung und Danksagung

Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Diplomarbeit selbstständig und nur mit Hilfe der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Tübingen, den 31. Oktober 1998

Bernhard Riecke

Danksagung

Für die Gelegenheit zur Durchführung dieser Diplomarbeit, deren Betreuung und Begutachtung möchte ich Prof. H. Ruder und Prof. H. H. Bühlhoff herzlich danken. Meinem tagtäglichen Betreuer Dr. H. A. H. C. van Veen gilt mein besonderer Dank für Diskussionen, Ratschläge und Unterstützung aller Art. Allen Mitgliedern des "VE-Lab" danke ich für die Unterstützung in realen und virtuellen Problemen aller Art und die angenehme, nur von Computer-generierter Entropie aufgeheizte Arbeitsatmosphäre. Speziellen Dank auch an Dipl. Phys. S. Steck für Gespräche und meisterhaftes Rotstiftschwingen. Bei allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe sowie Dipl. Biol. C. Holt und Dr. T. Kammer bedanke ich mich für die nette, freundschaftliche Atmosphäre. Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, durch deren vielfältige Unterstützung dieses Studium möglich wurde.

Literatur

- Alfano, P. L. & Michel, G. F. (1990). Restricting the field of view: Perceptual and performance effects. *Perceptual and Motor Skills*, **70**, 35–45.
- Benhamou, S. (1997). On systems of reference involved in spatial memory. *Behavioural Processes*, **40**(2), 149–163.
- Benhamou, S. & Poucet, B. (1995). A comparative analysis of spatial memory processes. *Behavioural Processes*, **35**(1–2), 113–126.
- Bennett, A. T. D. (1996). Do animals have cognitive maps? *Journal of Experimental Biology*, **199**(1), 219–224.
- Berthoz, A., Israël, I., Georgesfrancois, P., Grasso, R., & Tsuzuku, T. (1995). Spatial memory of body linear displacement: What is being stored? *Science*, **269**(5220), 95–98.
- Billinghurst, M. & Weghorst, S. J. (1995). The Use of Sketch Maps to Measure Cognitive Maps of Virtual environments. In *IEEE 1995 Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 40–47 Piscataway, NJ. IEEE Press.
- Bisetzky, A. R. (1957). Die Tänze der Bienen nach einem Fußweg zum Futterplatz. *Z. vergl. Physiol.*, **40**, 264–288.
- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Brun, R. (1915). Das Orientierungsproblem im allgemeinen und auf Grund experimenteller Forschungen bei den Ameisen. *Biol. Central*, **35**(4), 190–252.
- Bülthoff, H. H., Foese-Mallot, B. M., & Mallot, H. A. (1997). Virtuelle Realität als Methode der modernen Hirnforschung. In T. W. H. Krapp (Ed.), *Künstliche Paradiese, Virtuelle Realitäten. Künstliche Räume in Literatur-, Sozial- und Naturwissenschaften* (pp. 241–260). München: Wilhelm Fink Verlag.
- Burdea, G. & Coiffet, P. (1994). *Virtual Reality Technology*. New York: John Wiley & Sons. Inc.

- Burdea, G., Richard, P., & Coiffet, P. (1996). Multimodal virtual reality: Input-output devices, system integration, and human factors. *International Journal of Human-Computer Interaction*, **8**(1), 5–24.
- Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C., & Loomis, J. M. (1998). Locomotion mode affects the updating of objects encountered during travel: The contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **7**(2), 168–178.
- CyberGear (1995). *VRBike Research Platform (Software Specifications)*.
- Daniel, M.-P. & Denis, M. (1993). Spatial Descriptions as Navigational Aids: A Cognitive Analysis of Route Directions. *Kognitionswissenschaft*, **7**, 45–52.
- Darken, R. P., Allard, T., & Achille, L. B. (1998). Spatial orientation and wayfinding in large-scale virtual spaces: An introduction. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **7**(2), 101–107.
- Darken, R. P. & Sibert, J. L. (1996). Navigating Large Virtual Spaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, **8**(1), 49–71.
- Dichgans, J. & Brandt, T. (1978). *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VIII of *Perception*, chap. Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control, (pp. 756–804). Berlin Heidelberg: Springer.
- Distler, H. (1996). Psychophysical Experiments in Virtual Environments. In *Virtual Reality World 96 Conference Documentation*. München 1996: Computerwoche Verlag AG.
- Distler, H. K., van Veen, H. A. H. C., Braun, S., & Bülthoff, H. H. (1997). Untersuchung Wahrnehmungs- und Verhaltensleistungen des Menschen in virtuellen Welten. In W. Bruns, E. Honecker, B. Robben, & I. Rügge (Eds.), *Workshop 'Vom Bildschirm zum Handrad: Computer(be)nutzung nach der Desktop-Methapher'*. Forschungszentrum Arbeit und Technik, Universität Bremen, Germany, artec-paper 59 february 1998.
- Epstein, R. & Kanwisher, N. (1998). A cortical representation of local visual environment. *Nature*, **392**, 598–601.
- Etienne, A. S., Maurer, R., & Séguinot, V. (1996). Path Integration in Mammals and its Interaction with Visual Landmarks. *The Journal of Experimental Biology*, **199**(1), 201–209.
- Evans, G. W. (1980). Environmental Cognition. *Psychological Bulletin*, **88**(2), 259–287.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*, Vol. 1. Leipzig: Breitkopf und Harterl.
- Flach, J. M. (1990). Control with an eye for perception: Precursors to an active psychophysics. *Ecological Psychology*, **2**(2), 83.

- Fujita, N., Klatzky, R. L., Loomis, J. M., & Golledge, R. G. (1993). The Encoding-Error Model of Pathway Completion without Vision. *Geographical Analysis*, **25**(4), 295–314.
- Fujita, N., Loomis, J. M., Klatzky, R. L., & Golledge, R. G. (1990). A minimal representation for dead-reckoning in navigation: Updating the homing vector. *Geographical Analysis*, **22**, 326–335.
- Fukushima, S. S., Loomis, J. M., & Da Silva, J. A. D. (1997). Visual perception of egocentric distance as assessed by triangulation. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, **23**(1), 86–100.
- Gale, N., Golledge, R. G., Pellegrino, J. W., & Doherty, S. (1990). The Acquisition and Integration of Route Knowledge in an Unfamiliar Neighborhood. *Journal of Environmental Psychology*, **10**, 3–25.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. Learning, development, and conceptual change. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Gillner, S. & Mallot, H. A. (1998). Navigation and Acquisition of Spatial Knowledge in a Virtual Maze. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **10**, 445–463.
- Goldin, S. E. & Thorndyke, P. W. (1982). Simulating Navigation for Spatial Knowledge Acquisition. *Human Factors*, **24**(4), 457–471.
- Görner, P. (1958). Die optische und kinästhetische Orientierung der Trichterspinnne *Agelena labyrinthica*. *Z. vergl. Physiol.*, **41**(8), 111–153.
- Hendrix, C. & Barfield, W. (1996). Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **5**(3), 274–289.
- Henry, D. (1992). Spatial perception in virtual environments: Evaluating an architectural application. Master's thesis, University of Washington, HITL, Seattle.
- Ivanenko, Y. P., Viaud-Delmon, I., Siegler, I., Israël, I., & Berthoz, A. (1998). The vestibulo-ocular reflex and angular displacement perception in darkness in humans: adaptation to a virtual environment. *Neurosci. Lett.*, **241**(2-3), 167 – 170.
- Johansson, G. & Borjesson, E. (1989). Toward a new theory of vision studies in wide-angle space perception. *Ecological Psychology*, **1**(4), 301–331.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Lilienthal, M. G., Berbaum, K. S., & Lawrence (1992). Profile Analysis of Simulator Sickness Symptoms: Application to Virtual Environment Systems. *Presence: Teleoperator & Virtual Environment*, **1**(3), 295–301.
- 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: Teleoperator & Virtual Environment*, **6**(6), 638–644.

- Klatzky, R. A. (1998). Allocentric and Egocentric Spatial Representations: Definitions, Distinctions, and Interconnections. In C. Freska, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition: an interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge*, Vol. 1404 of *Lecture notes in computer science: Lecture notes in artificial intelligence* (pp. 1–17). Berlin Heidelberg: Springer.
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1990). Acquisition of route and survey knowledge in the absence of vision. *Journal of Motor Behavior*, **22**(1), 19–43.
- Loomis, J. M., da Silva, J. A., Fujita, N., & Fukusima, S. S. (1992). Visual space perception and visually directed action. *Journal Of Experimental Psychology Human Perception And Performance*, **18**(4), 906–921.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: assessment of path integration ability. *J. Exp. Psychol. Gen.*, **122**(1), 73–91.
- Loomis, J. M., Da Silva, J. A., Philbeck, J. W., & Fukusima, S. S. (1996). Visual perception of location and distance. *Current Directions in Psychological Science*, **5**(3), 72–77.
- Maguire, E. A., Burgess, N., Donnett, J. G., Frackowiak, R. S. J., Frith, C. D., & O’Keefe, J. (1998a). Knowing where and getting there: a human navigation network. *Science*, **280**(1), 921–924.
- Maguire, E. A., Frith, C. D., Burgess, N., Donnett, J. G., & O’Keefe, J. (1998b). Knowing where things are: Parahippocampal involvement in encoding object locations in virtual large-scale space. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **10**(1), 61–76.
- May, M., Péruch, P., & Savoyant, A. (1995). Navigating in a virtual environment with map-acquired knowledge: Encoding and alignment effects. *Ecological Psychology*, **7**(1), 21–36.
- McNaughton, B. L., Barnes, C. A., Gerrard, J. L., Gothard, K., Jung, M. W., Knierim, J. J., Kudrimoti, H., Qin, Y., Skaggs, W. E., Suster, M., & Weaver, K. L. (1996). Deciphering the hippocampal polyglot: The hippocampus as a path integration system. *Journal of Experimental Biology*, **199**, 173–185.
- Mittelstaedt, H. & Mittelstaedt, M.-L. (1982). Homing by path integration. In F. Papi & H. Wallraff (Eds.), *Avian navigation* (pp. 290 – 297). Berlin: Springer.
- Müller, M. & Wehner, R. (1988). Path integration in desert ants *Cataglyphis fortis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **85**, 5287–5290.
- Neale, D. C. (1996). Spatial perception in desktop virtual environments. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40th annual meeting* Santa Monica, Calif.

- O'Keefe, J. & Dostrovsky, J. (1971). The hippocampus as spatial map. Preliminary evidence from unit activity in the freely moving rat. *Brain Research*, **34**, 171–175.
- O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford, England: Clarendon.
- Péruch, P. & Gaunet, F. (1998). Virtual environments as a promising tool for investigating human spatial cognition. *Current Psychology of Cognition*, **17**(4–5), 881–899.
- Péruch, P., May, M., & Wartenberg, F. (1997). Homing in virtual environments: Effects of field of view and path layout. *Perception*, **26**(3), 301–311.
- Péruch, P., Vercher, J.-L., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological-Psychology*, **7**(1), 1–20.
- Peterson, B., Wells, M., Furness III, T. A., & Hunt, E. (1998). The Effects of the Interface on Navigation in Virtual Environments. In *Human Factors and Ergonomics Society 1998 Annual Meeting*. (submitted).
- Presson, C. C. & Montello, D. R. (1994). Updating after rotational and translational body movements: Coordinate structure of perspective space. *Perception*, **23**(12), 1447–1455.
- Pstoka, J. & Lewis, S. A. (1995). Effects of Field of View on Judgements of Self-Location: Distance Estimations using Planview Representations as a Function of Observer Eye Station (ESP) and geometric Field of View (FOVg). Tech. rep., USARI.
- Pstoka, J., Lewis, S. A., & King, D. (1998). Effects of Field of View on Judgments of Self-Location: Distortions in Distance Estimations Even When the Image Geometry Exactly Fits the Field of View. *Presence: Teleoperator & Virtual Environments*, **7**(4).
- 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**(2), 143–159.
- Ruddle, R. A., Payne, S. J., & Jones, D. M. (1998). Navigating large-scale "desk-top" virtual buildings: Effects of orientation aids and familiarity. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **7**(2), 179–192.
- Samsonovich, A. & McNaughton, B. L. (1997). Path integration and cognitive mapping in a continuous attractor neural network model. *Journal of Neuroscience*, **17**(15), 5900–5920.
- Sauvé, J. P. (1989). *L'orientation spatiale: formalisation d'un modèle de mémorisation égocentrée et expérimentation chez l'homme*. Ph.D. thesis, Université d'Aix-Marseille II.
- Schloerb, D. W. (1995). A Quantitative Measure of Telepresence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **4**(1), 64–81.

- Schölkopf, B. & Mallot, H. A. (1995). View-based cognitive mapping and path planning. *Adaptive Behavior*, **3**, 311–348.
- Seguinot, V., Maurer, R., & Etienne, A. S. (1993). Dead reckoning in a small mammal: the evaluation of distance. *J. Comp. Physiol. A.*, **173**, 103–113.
- Sellen, K. (1998). Richtungsschätzungen in realen und virtuellen Umgebungen. Master's thesis, Fakultät Biologie, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- Sharp, A. (1993). *Bicycles and Tricycles: An elementary treatise on their design and construction* (fifth printing edition). Cambridge, Massachusetts: MIT press.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **1**(1), 120–126.
- Singer, M., Allen, R. C., McDonald, D. P., & Gildea, J. P. (1997). Terrain Appreciation in Virtual Environments: Spatial Knowledge Acquisition. Tech. rep. 1056, U.S. Army Research Institut for Behavioral and Social Sciences.
- Slater, M. & Usoh, M. (1993). Simulating peripheral vision in immersive virtual environments. *Computation & Graphics*, **17**, 643–653.
- Steck, S. D. & Mallot, H. A. (1998). The Role of Global and Local Landmarks in Virtual Environment Navigation. Tech. rep. 63, Max-Planck-Institute for Biological Cybernetics, Tübingen, Germany.
- Taube, J. S. (1998). Head direction cells and the neurophysiological basis for a sense of direction. *Prog-Neurobiol.*, **55**(3), 225–256.
- Taube, J. S., Muller, R. U., & Ranck, J. B. J. (1990a). Head direction cell recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis. *Journal of Neuroscience*, **10**(2), 420–435.
- Taube, J. S., Muller, R. U., & Ranck, J. B. J. (1990b). Head direction cell recorded from the postsubiculum in freely moving rats. II. Effect of environmental manipulations. *Journal of Neuroscience*, **10**(2), 436–447.
- Thorndyke, P. W. & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, **14**(4), 560–589.
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in Rats and Men. *Psychological Review*, **55**, 189–208.
- 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.
- Waller, D., Hunt, E., & Knapp, D. (1998). The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. *Presence: Teleoperator & Virtual Environments*, **7**(2), 129–143.

- Wartenberg, F., May, M., & Péruch, P. (1998). Spatial Orientation in Virtual Environments: Background Considerations and Experiments. In C. Freska, C. Habel, & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition: an interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge*, Vol. 1404 of *Lecture notes in computer science: Lecture notes in artificial intelligence* (pp. 469–489). Berlin Heidelberg: Springer.
- Wehner, R., Michel, B., & Antonsen, P. (1996). Visual navigation in insects: Coupling of egocentric and geocentric information. *Journal of Experimental Biology*, **199**(1), 129–140.
- Werner, S., Krieg-Brückner, B., Mallot, H., Schweizer, K., & Freksa, C. (1997). Spatial Cognition: The Role of Landmark, Route, and Survey Knowledge in Human and Robot Navigation. In W. Brauer (Ed.), *Informatik '97. Informatik als Innovationsmotor*, No. TG 27 in *Informatik aktuell* Berlin. GI – Gesellschaft für Informatik, Springer Verlag.
- Wilson, P. N., Foreman, N., & Tlauka, M. (1997). Transfer of Spatial information from a Virtual to a Real Environment. *Human Factors*, **39**(4), 526–531.
- Witmer, B. G., Bailey, J. H., Knerr, B. W., & Parsons, K. C. (1996). Virtual spaces and real world places: Transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies*, **45**(4), 413–428.
- Yoshino, R. (1991). A note on cognitive maps: An optimal spatial knowledge representation. *Journal of Mathematical Psychology*, **35**(3), 371–393.
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, Interaction, and Presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, **1**(1), 127–131.