

EBERHARD-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN
Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik

Geraldine Hopf

**Iterierte
Dreiecksvervollständigung
in virtueller Realität –
Können metrische Informationen
in das räumliche Langzeitgedächtnis
übernommen werden?**

Diplomarbeit

Betreuer: Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot
Lehrstuhl Kognitive Neurowissenschaft
Fakultät für Biologie

Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel
Lehrstuhl Technische Informatik
Wilhelm-Schickard-Institut für Informatik

Begonnen am: 02. April 2008

Beendet am: 19. September 2008

Erklärung

Hiermit versichere ich, diese Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen benutzt zu haben.

Tübingen am 19. September 2008

Geraldine Hopf

Kurzfassung

Diese Arbeit nutzt die iterierte Dreiecksvervollständigung um Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu erhalten.

Die iterierte Dreiecksvervollständigung ist eine Erweiterung der Dreiecksvervollständigung. Zu den drei Punkten A, B und C, die das erste Dreieck aufspannen, kommen noch zwei weitere Punkte, D und E, hinzu. Das erste Dreieck wird durch die Punkte ABC erstellt, das zweite Dreieck durch CDE usw. Insgesamt entstehen so fünf Dreiecke: ABC, CDE, EAB, BCD und DEA. Die Strecke vom jeweiligen Startpunkt über den Wegpunkt bis zum Endpunkt wird von der Versuchsperson abgegangen. Aufgabe der Versuchsperson ist es, durch Wegintegration vom jeweiligen Endpunkt auf den Startpunkt zurück zu zeigen. Während des Versuchs baut sich im räumlichen Langzeitgedächtnis eine kognitive Karte auf. Wenn Informationen aus der Wegintegration in diese kognitive Karte eingebunden werden können, dann sollte sich die Leistung der Versuchsperson steigern.

Um nur Wegintegration als Navigationsstrategie zuzulassen, wurde eine virtuelle Versuchsumgebung erstellt. Die Versuchsperson nimmt die virtuelle Umgebung über einen vor den Augen angebrachten Bildschirm (engl.: *head mounted display – HMD*) wahr. In dieser virtuellen Umgebung kann sich die Versuchsperson frei bewegen und sich so nicht nur visuelle sondern auch propriozeptische, vestibuläre und efferente Reize zunutze machen.

Hier wird die iterierte Dreiecksvervollständigung mit drei verschiedenen Zeigemethoden kombiniert: Spiegel, Schauen und Laufen. Alle Versuchspersonen waren in der Lage die Aufgabe in der virtuellen Welt zu bewältigen. Dabei zeigten viele Versuchspersonen eine gute Leistung. Sie waren in der Lage die Konfiguration der Objekte zu reproduzieren. Trotzdem zeigte sich bei keiner der drei Zeigemethoden eine Lernkurve. Daher muss man davon ausgehen, dass keine metrischen Informationen aus der Wegintegration in das räumliche Langzeitgedächtnis aufgenommen werden. Die iterierte Dreiecksvervollständigung mit den Zeigemethoden Spiegel, Schauen und Laufen in virtueller Umgebung liefert keine Hinweise.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich beim Lehrstuhl für kognitive Neurowissenschaft bedanken, mit dem ich sehr gerne zusammengearbeitet habe. Insbesondere möchte ich Professor Mallot erwähnen, für die Bereitstellung des Diplomarbeitsthemas und des Arbeitsplatzes, die Korrektur sowie für kritische und konstruktive Diskussionen.

Professor Rosenstiel vom Lehrstuhl Technische Informatik des Wilhelm-Schickard-Institut danke ich dafür, dass er die Zweitkorrektur übernommen hat.

Meiner Betreuerin Dagmar Schoch danke ich für die gute Betreuung, die vielen Diskussionen und das unermüdliche Korrigieren meiner Ausarbeitungen, sowie für ihre Geduld und ihr Verständnis.

Danke an alle Mitarbeiter des Lehrstuhls, die gemeinsam für eine freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre sorgten und mit Rat und Tat dienen konnten.

Natürlich auch vielen Dank an alle Probanden, die bei meinem Experiment mitgewirkt haben.

Ich möchte auch meiner Familie danken, besonders meinen Eltern, die mir nicht nur mein Studium ermöglicht haben, sondern auch immer an gelaubt haben und mir immer zur Seiten standen. Auch bei all meinen Freunden möchte ich mich für viele schöne Stunden bedanken, besonders aber bei meinem Freund möchte ich mich für seine Geduld bedanken, die er mir immerzu entgegenbrachte.

Danke!

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einführung | 1 |
| 2 | Raumkognition | 3 |
| 2.1 | Wegintegration | 3 |
| 2.1.1 | Berechnungsmodelle | 3 |
| 2.1.2 | Dreiecksvervollständigung | 4 |
| 2.2 | Kognitive Karte | 5 |
| 2.3 | Neurophysiologie | 6 |
| 2.4 | Zusammenfassung | 7 |
| 3 | Virtuelle Realität | 9 |
| 3.1 | Entwicklung einer virtuellen Versuchsumgebung | 10 |
| 3.2 | Vorteile bei der Benutzung einer virtuellen Realität | 12 |
| 3.3 | Zusammenfassung | 13 |
| 4 | Versuchsaufbau | 15 |
| 4.1 | Iterierte Dreiecksvervollständigung | 15 |
| 4.2 | Reale Umgebung | 17 |
| 4.3 | Virtuelle Umgebung | 19 |
| 4.4 | Entwicklung der Zeigemethoden | 19 |
| 4.4.1 | Kompass | 21 |
| 4.4.2 | Spiegel | 21 |
| 4.4.3 | Schauen | 21 |
| 4.4.4 | Laufen | 22 |
| 4.4.5 | Auswahl der Zeigemethoden für den Hauptversuch | 22 |
| 4.5 | Versuchsablauf | 23 |
| 4.5.1 | Versuchspersonen | 23 |
| 4.5.2 | PTA-Test | 24 |
| 4.5.3 | Versuchseinführung | 24 |
| 4.5.4 | Aufgaben der Versuchsperson in der virtuellen Realität | 24 |
| 4.6 | Zusammenfassung | 25 |
| 5 | Ergebnisse und Diskussion | 29 |
| 5.1 | Vorverarbeitung der Daten | 30 |
| 5.2 | Visualisierung der Rohdaten | 31 |
| 5.3 | Richtungsfehler | 33 |
| 5.4 | Auswertungen der verschiedenen Zeigemethoden | 38 |
| 5.4.1 | Auswertung der Zeigemethode Spiegel | 38 |
| 5.4.2 | Auswertung der Zeigemethode Schauen | 40 |
| 5.4.3 | Auswertung der Zeigemethode Laufen | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.5 | Auswertung der gezeichneten Karten | 46 |
| 5.6 | Diskussion der Ergebnisse | 49 |
| 5.6.1 | Vergleich mit der Literatur | 49 |
| 5.6.2 | Vergleich der Ergebnisse mit Schoch | 53 |
| 5.7 | Zusammenfassung | 54 |
| 6 | Ausblick | 58 |
| 6.1 | Weiterführung des Versuchslayouts | 58 |
| 6.2 | Verbesserung der Ausrüstung | 58 |
| 6.3 | Weitere Versuche der iterierten Dreiecksvervollständigung in virtueller Umgebung | 59 |
| A | Versuchsanweisungen | 61 |
| B | Probleme und Lösungsvorschläge | 65 |
| C | Dokumentation der Versuchseinstellungen | 67 |
| D | Spezifikation der Hard- und Software | 69 |
| E | Hilfestellungen zum Versuchsablauf | 71 |
| F | Perspektivischer Wahrnehmungstest Test | 73 |
| | Literaturverzeichnis | 75 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Mittelwert und Varianz des Richtungsfehlers | 36 |
| 5.2 | Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Spiegel. | 39 |
| 5.3 | Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Schauen. | 40 |
| 5.4 | Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Laufen – Distanzfehler | 43 |
| 5.5 | Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Laufen – Streckenfehler | 45 |
| 5.6 | Mittelwert und Varianz der gezeichneten Karten | 47 |
| 5.7 | Zusammenfassung der Statistik über die Runden | 56 |
| 5.8 | Zusammenfassung der Statistik über die Objekte | 57 |
| E.1 | Versuchsablauf | 71 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Wegintegration | 4 |
| 2.2 | Dreiecksvervollständigung | 5 |
| 3.1 | VR-System | 10 |
| 3.2 | Spiralenmodell | 11 |
| 4.1 | Iterierte Dreiecksvervollständigung | 16 |
| 4.2 | Versuchsausrüstung | 18 |
| 4.3 | Versuchsperson mit Versuchsausrüstung | 18 |
| 4.4 | Virtuelle Umgebung aus der Vogelperspektive | 20 |
| 4.5 | Virtuelle Umgebung aus der Sicht einer Versuchsperson | 26 |
| 5.1 | Farbkodierung der Objekte | 29 |
| 5.2 | Mögliche Fehler der Versuchsperson | 30 |
| 5.3 | Visualisierung der Rohdaten | 32 |
| 5.4 | Positionsfehler zweier Versuchspersonen | 34 |
| 5.5 | Richtungsfehler der Zeigemethode Spiegel | 35 |
| 5.6 | Richtungsfehler der Zeigemethode Schauen | 36 |
| 5.7 | Richtungsfehler der Versuchspersonen | 37 |
| 5.8 | Zeigefehler Spiegel | 39 |
| 5.9 | Zeigefehler Schauen | 41 |
| 5.10 | Positionsdaten mit Fehlerellipsen der Zeigemethode Laufen | 42 |
| 5.11 | Distanzfehler der Zeigemethode Laufen | 43 |
| 5.12 | Länge der Trajektorien | 44 |
| 5.13 | Differenz der Trajektorie und der Sollstrecke | 45 |
| 5.14 | Stilisierte Karte | 46 |
| 5.15 | Stilisierte Karten zweier Versuchspersonen | 47 |
| 5.16 | Gezeichnete Karten zweier Versuchspersonen | 48 |
| F.1 | PTA-Test | 73 |
| F.2 | Beispiel des PTA-TestS | 74 |

1 Einführung

In dieser Arbeit werden Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis gesucht. Dazu wird die Frage untersucht, ob der Mensch metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis speichert und in einer Navigationsaufgabe verwenden kann. Wäre dies der Fall, so könnte der Mensch Parallelität, Kollinearität, metrische Winkel und Distanzen verwenden, um eine kognitive Karte aufzubauen. Diese kognitive Karte würde eine präzise Repräsentation aller Punkte und Objekte in der Umgebung enthalten. Diese Arbeit soll daher das Verständnis vom räumlichen Gedächtnis der Umgebung verfeinern.

Um Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu erhalten wurde das Paradigma der iterierten Dreiecksvervollständigung gewählt. Dabei muss eine Versuchsperson jeweils zwei Schenkel eines vorgegebenen Dreiecks ablaufen. Der Heimvektor weist dabei immer auf den Startpunkt und wird durch die Wegintegration ständig aktualisiert. In einer Zeigeaufgabe gibt die Versuchsperson diesen Heimvektor wieder. Danach werden die zwei Schenkel des sich anschließenden Dreiecks abgelaufen, worauf wieder die Zeigeaufgabe folgt. So entstehen aus fünf Punkten insgesamt fünf Dreiecke. Jeder Punkt wird dabei als Startpunkt, aber auch als Weg- und Endpunkt benutzt. Die fünf Punkte werden so mehrmals angelaufen, auch die fünf verschiedenen Dreiecke werden mehrmals wiederholt. Im Laufe des Versuchs entsteht im räumlichen Langzeitgedächtnis nach und nach eine kognitive Karte. Die Genauigkeit dieser Karte soll überprüft werden. Können metrische Informationen, die durch Wegintegration bereitgestellt werden, in die kognitive Karte eingebaut werden, so ist zu erwarten, dass die Genauigkeit der Versuchspersonen bei der Zeigeaufgabe stetig zunimmt.

Für den in dieser Arbeit beschriebenen Versuch wurde eine virtuelle Umgebung entworfen, die keine verlässlichen Landmarken enthält. Somit wird bei Bewältigung der Dreiecksvervollständigung in dieser Umgebung nur Wegintegration als Navigationsstrategie zugelassen. Virtuelle Realitäten haben außerdem den Vorteil, dass sie konstant bleiben, auch über viele Versuchstage hinweg, und dabei leicht reproduzierbar sind. Daten können dabei sehr einfach erhoben werden, danach folgt eine vollautomatische Weiterverarbeitung und Analyse.

In Kapitel 2 folgt eine genaue Beschreibung des biologischen Hintergrundes. Dabei werden verschiedene Theorien der Raumkognition vorgestellt. Diese Grundlagen helfen einen Versuch zu planen, der genau auf den Menschen ausgelegt ist. Eine Möglichkeit für den Entwurf von Software für virtuelle Welten wird ausführlich in Kapitel 3 beschrieben. Diese beruht auf dem Prinzip einer Softwarespirale für die Programmierung. Hierbei ist es besonders wichtig die virtuelle Welt genau an die späteren Aufgaben und Anforderungen anzupassen. Zur Verfügung stehende Ressourcen, wie z.B. Hardware, sollten dabei optimal genutzt werden. Daher muss leistungsorientiert

programmiert werden. Im daran anschließenden Kapitel 4 wird der Versuchsaufbau ausführlich beschrieben. Dabei wird darauf eingegangen, wie dieser immer wieder verfeinert wurde und so optimal an die zur Verfügung stehende Hardware und den Menschen angepasst wurde. Dadurch entstand ein System in einer virtuellen Welt, das die zuvor festgelegten informatischen und biologischen Anforderungen erfüllt. Außerdem wird der genaue Versuchsablauf erklärt. Dabei wird insbesondere auf die Zeigeaufgabe eingegangen, da hierfür drei verschiedene Zeigemethoden entwickelt wurden. Die Ergebnisse der Versuchsreihen werden in Kapitel 5 vorgestellt und diskutiert. Alle Versuchspersonen waren in der Lage die Aufgabe in der virtuellen Welt zu bewältigen. Dabei zeigen viele Versuchspersonen eine gute Leistung. Sie waren in der Lage die Konfiguration der Objekte zu reproduzieren. Insbesondere durch die drei verschiedenen Zeigemethoden konnten euklidische Winkel und Distanzen untersucht werden, um Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu finden. Kapitel 6 zeigt eine Fortführung der Versuchsidee und schlägt Verbesserungen der Versuchsausrüstung vor. Außerdem werden weitere Versuche vorgeschlagen, die Hinweise auf metrische Informationen in kognitiven Karten geben könnten.

2 Raumkognition

Erfolgreiche räumliche Orientierung und Navigation hängt von verschiedenen Sinnesmodalitäten ab. Im Zusammenspiel der Sinne wird die Umgebung erkannt und in eine mentale räumliche Repräsentation gebracht. Um die mentale Repräsentation weiter zu verwenden, muss die eigene Position und Orientierung ständig aktualisiert werden. Damit kann z.B. der nächste Schritt geplant werden. Die Navigation besteht aus mehreren Strategien. Eine davon ist die Navigation anhand von Landmarken, eine andere ist die Wegintegration. Da diese für diese Arbeit relevant ist wird sie in Abschnitt 2.1 genauer beschrieben.

Für die Zielführung (engl.: *piloting*) werden sichtbare, hörbare oder auch fühlbare Referenzpunkte benutzt, ohne dass Koordinaten oder metrische Information nötig sind. Diese Referenzpunkte werden auch Landmarken genannt, wobei der Begriff Landmarke nur ungenau definiert ist. Mithilfe von Landmarken können auch Routen geplant werden, indem an einer Landmarke oder an einer Konfiguration von Landmarken eine neue Richtung eingeschlagen wird (Mallot [2005]). Bei Bienen wird dazu oft das Schnappschussverfahren verwendet. Von einem Punkt an dem man seine Richtung ändern muss, merkt man sich ein Abbild der Umwelt, den sogenannten Schnappschuss. Nähert man sich nun dieser Umgebung, versucht man sich so zu stellen, dass das zu sehende Bild mit dem gespeicherten Schnappschuss genau übereinstimmt. Hat man dies erreicht, kann man in die gewünschte Richtung weiter navigieren, bis zum nächsten Wegpunkt.

2.1 Wegintegration

Fehlen Landmarken zur Navigation wird Wegintegration benutzt. Diese bestimmt kontinuierlich die Eigenbewegung aus dem vestibulären System, der Propriozeption, der Efferenzkopie und dem visuellen System. Beschleunigung, optischer Fluss, die eigene Lage, aus dem Bewegungssinn der Muskeln, und zentrale Steuersignale geben dabei Aufschluss über die zurückgelegte Distanz und Richtung zum Ausgangspunkt und bestimmen damit den Heimvektor (engl.: *home vector*). Da sich bei der Integration die Fehler akkumulieren (Mallot [2005]), lässt sich so besser über kleine Strecken als über große Strecken navigieren (Riecke [2003]).

2.1.1 Berechnungsmodelle

In Benhamou, Séguinot [1995] werden fünf verschiedene Berechnungsmodelle für die Wegintegration vorgestellt. Vier von diesen Modellen berechnen die Blickrichtung zum Ausgangspunkt rekursiv, wobei drei davon auch die Distanz rekursiv berechnen. Ein Wegintegrationsmodell von Benhamou wurde entwickelt, um den Nutzen eines egozentrisch kodierten Modells gegen zufällige Fehler der Wegintegration zu untersu-

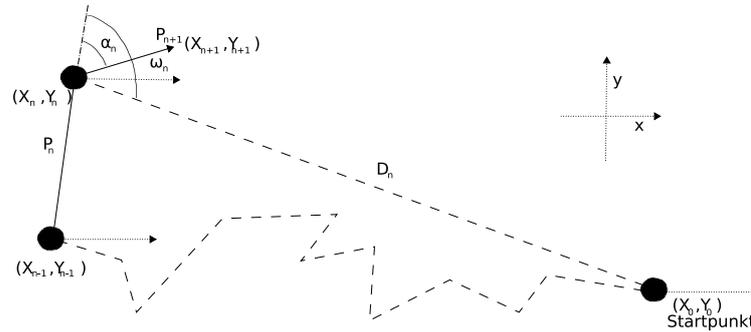


Abbildung 2.1: Wegintegrationsmodell nach Benhamou

chen. Der Ursprung des egozentrischen, kartesischen Koordinatensystems (X', Y') ist immer die aktuelle Position des Lebewesens. Die x' -Achse entspricht der Blickrichtung. Die Koordinaten des Startpunktes im egozentrischen Referenzsystem (X', Y') nach $n + 1$ Schritten berechnen sich gemäß:

$$\begin{aligned} X'_{n+1} &= D_n \cdot \cos(\omega_n - \alpha_n) - P_{n+1} \quad \text{und} \\ Y'_{n+1} &= D_n \cdot \sin(\omega_n - \alpha_n) \end{aligned}$$

Dabei ist D_n die Distanz zum Startpunkt und ω_n die Richtung zum Startobjekt im n -ten Wegpunkt. α_n gibt die Richtungsänderung zwischen dem n -ten und dem $n + 1$ -ten Schritt an, P_{n+1} die Länge des $n + 1$ -ten Schritts (siehe Abb. 2.1).

Der Winkel ω_{n+1} zum Startpunkt ist dann:

$$\begin{aligned} \omega_{n+1} &= \arctan(Y'_{n+1}/X'_{n+1}) + b\pi \quad \text{mit} \\ b &= 0 \quad \text{wenn } X'_{n+1} > 0 \\ b &= 1 \quad \text{wenn } X'_{n+1} \leq 0 \end{aligned}$$

Die Distanz D_{n+1} beträgt:

$$D_{n+1} = \sqrt{X'^2_{n+1} + Y'^2_{n+1}}$$

Da weder Tiere noch Menschen diese mathematisch korrekten Formeln für die Wegintegration benutzen, schlugen die Autoren vor, ein neues Wegintegrationsmodell mit einer Näherungslösung zu entwickeln. Eine Näherungslösung ist einfacher als eine komplexe, mathematische Lösung. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass das neuronale System eines Tieres auch eine Näherungslösung speichert (Benhamou, Séguinot [1995]).

2.1.2 Dreiecksvervollständigung

Ein oft genutztes Paradigma um Wegintegration zu testen ist die Dreiecksvervollständigung (Foo et al. [2005], Klatzky et al. [1998], Riecke et al. [2002]). Dabei geht die

Versuchsperson zwei Schenkel eines Dreiecks ab und muss wieder zum Startpunkt zurückfinden. Die Versuchsperson beginnt also am Startpunkt und läuft zu Punkt A, dabei wird der Heimvektor durch die Wegintegration ständig aktualisiert. Auf dem ersten Teilabschnitt ändert er sich allerdings nur in seiner Länge, die Richtung bleibt gleich. An Punkt A angekommen ändert die Versuchsperson die Richtung und geht nach Punkt B. Von nun an ändert sich der Heimvektor in Richtung und Länge. An Punkt B angekommen zeigt der Heimvektor auf den Startpunkt, er entspricht im Idealfall dabei der unbekanntem Strecke (siehe Abb. 2.2) (Riecke et al. [2002]). Erreicht die Versuchsperson bei der Dreiecksvervollständigung exakt den Startpunkt oder zeigt je nach Aufgabenstellung genau auf ihn, so war die Wegintegration fehlerfrei. Richtung bzw. Richtung und Länge des Heimvektors konnten also genau reproduziert werden.

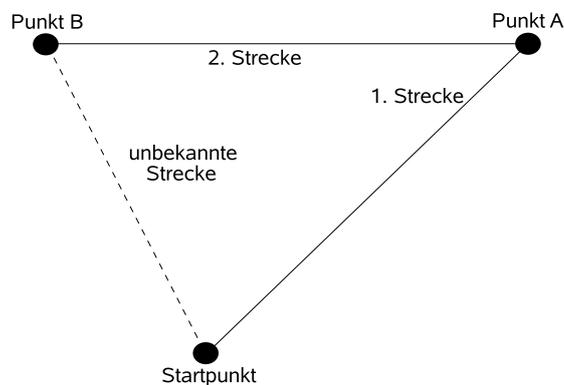


Abbildung 2.2: Dreiecksvervollständigung: Die erste und zweite Strecke wurden bereits abgelaufen, die Versuchsperson soll die dritte, unbekanntem Strecke gehen, oder auf den Startpunkt zurückzeigen.

2.2 Kognitive Karte

Die meist zitierte Definition einer kognitiven Karte stammt von Gallistel [1990]. Nach ihm ist eine kognitive Karte eine Repräsentation der Umgebung im zentralen Nervensystem. Es werden makroskopische, geometrische Relationen von Flächen in der Umgebung dargestellt, die benutzt werden um Bewegungen in der Umwelt zu planen. Die geometrische Information ist hierbei euklidisch und nicht affin, projektiv oder topologisch. Bei „höheren“ Lebewesen besteht die Repräsentation der Umwelt aus mehr detaillierteren Informationen als bei „niederen“.

In der Literatur sind kognitive Karten sehr umstritten. Daher gibt es unterschiedliche Definitionen, manche streiten ihre Existenz ganz ab, siehe Bennett [1996]. Geografische Karten sind beständig, geozentrisch und allumfassend. Die interne räumliche Repräsentation des Menschen besitzt keine dieser Eigenschaften, schreiben Wang, Spelke [2002]. Wie viele Tiere navigieren Menschen durch Formen, beibehalten und dynamisch aktualisieren ihrer momentanen Beziehung zu signifikanten Orten oder Plätzen in ihrer Umgebung. Warum Menschen trotzdem so anpassungsfähig und beweglich navigieren, können vielleicht neue Ansätze aus der Phylogenese und Ontogenese erklären. Menschen entwickeln neue räumliche Repräsentationen und neue Navigations-

strategien durch ihre einzigartige und besondere symbolische Kapazität (Wang, Spelke [2002]).

Kognitive Karten ermöglichen implizites Lernen, zielabhängige Flexibilität bei der Planung von Routen und Transfer von Wissen. Sie bilden ein deklaratives Ortsgedächtnis. Die Repräsentation der metrischen Informationen ist sehr wichtig. Das Zusammenfügen mehrerer Informationen aus Wegintegration und/oder Landmarken erlaubt die Planung von Abkürzungen über nicht exploriertes Gebiet (Mallot [2005]). Nach O'Keefe, Nadel [1978] ist eine kognitive Karte auch mehr als eine Route, da eine kognitive Karte auch ohne Landmarken funktioniert und somit flexibel ist.

Über die Kodierungsart der Informationen einer kognitiven Karte gibt es verschiedene Theorien, die in Meilinger et al. [2007] wie folgt beschrieben werden:

1. Die Information wird unabhängig von der Orientierung gespeichert.

In gut bekannten Umgebungen sind die Objekte allozentrisch angeordnet. Die Relationen der Landmarken zueinander sind unabhängig von der momentanen Blickrichtung kodiert. Auf dieses Objekt-zu-Objekt System kann daher immer gleich gut und gleich schnell zugegriffen werden (Sholl [2001]). Dabei hilft ein Selbst-Referenz System, in dem die Körperachsen, vorne/hinten, rechts/links, repräsentiert sind. Durch kalkulieren der Distanz und Richtung kann das Selbst-Referenz System relativ zum Objekt-zu-Objekte System bewegt werden.

2. Die Information wird abhängig von der Orientierung gespeichert, dabei gibt es eine Referenzrichtung.

Hier wird, wie oben, ein allozentrisches Objekt-zu-Objekt System angenommen. Trotzdem werden die Objekte von einer oder zwei bestimmten Referenzrichtungen, z.B. Nord, abhängig kodiert. Diese Referenzrichtung ist oft die Richtung, durch die man eine neue Umgebung zuerst wahrgenommen hat, oder eine wesentliche Achse der Umgebung. In einem rechteckigen Raum z.B. die längere Wand (Mou et al. [2004]).

3. Die Information wird abhängig von der Orientierung gespeichert, sie ist erfahrungsabhängig.

Es entsteht ein Blick-Graph, die Knoten entsprechen den verschiedenen Ansichten. Stimmt die zeitliche Abfolge zwischen diesen Ansichten, wird eine Kante eingefügt. Man kann sich also am Besten an die Objekte und ihre Konstellation erinnern, wenn man den Raum aus einer schon bekannten Perspektive wahrnimmt, anstatt aus einer völlig neuen Perspektive (Mallot, Gillner [2000]).

2.3 Neurophysiologie

Der Hippocampus und andere kortikale Areale sind für die Kodierung und Speicherung von Positionsdaten im Raum zuständig (Mallot [2005], May [2000]). Hierbei bleibt weiterhin unklar, was genau Positionsdaten sind. Durch dieses räumliche Langzeitgedächtnis ist eine Orientierung und zielgerichtete Navigation in komplexen Umgebungen möglich. In Versuchen an Nagern und Primaten wurden Mikroelektroden im

Hippocampus implantiert und die Zellaktivität aufgezeichnet. Dabei wurden Platzzellen (engl.: *place cells*) und auch Ausrichtungszellen oder Ansichtszellen (engl.: *head-direction cells*) gefunden. Diese Neurone sind aktiv, wenn sich das Tier an einer bestimmten Stelle aufhält oder in eine bestimmte Richtung schaut. Somit werden Orte bzw. Blickrichtungen kodiert. Im Gehirn von Primaten wurden mehr Ausrichtungszellen als Platzzellen gefunden, Blickrichtungen im Langzeitgedächtnis zu speichern sollte daher einfacher sein als Orte (Rolls et al. [1998]).

2.4 Zusammenfassung

Kapitel 2 hat sich mit den biologischen Grundlagen der Raumkognition beschäftigt. Wegintegration ist eine Navigationsstrategie, die metrische Informationen in Form von Winkeln und Distanzen zur Verfügung stellt. Durch die Dreiecksvervollständigung mit entsprechender Zeigeaufgabe können diese Informationen leicht abgefragt werden. Eine kognitive Karte im räumlichen Langzeitgedächtnis enthält Informationen über die Konfiguration verschiedener Objekte und Punkte in der Umgebung. Wenn die metrischen Informationen der Wegintegration in diese kognitive Karte integriert werden würden, dann wäre die Repräsentation der Objekte in der Umgebung auch metrisch. Eine metrische Karte enthält präzise Repräsentationen über alle Objekte und Punkte in der Umwelt. Bei einer kognitiven Karte, die euklidische Informationen enthält, sind z.B. genaue Abkürzungen zwischen zwei Punkten durch unbekanntes Gebiet möglich, sowie flexible Routenplanung, falls Landmarken fehlen. Auf diesen Grundlagen aufbauend kann ein Versuch mit Menschen geplant werden, der Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis sucht.

3 Virtuelle Realität

In einer virtuellen Realität (VR) versucht ein computergestütztes System mit der Realität vergleichbare Sinneseindrücke und Erfahrungen an einen Benutzer zu geben. Diese Erfahrungen werden synthetisch oder auch virtuell genannt, da die vorhandenen sensorischen Informationen von dem System einer virtuellen Realität nachgebildet werden. So ein System einer virtuellen Realität besteht meistens aus einem multimodalen Anzeigesystem für den Benutzer, Sensoren um die Aktionen des Benutzers aufzuzeichnen und einem Rechner, der die Benutzeraktionen verarbeitet.

Ein multimodales Anzeigesystem besteht nicht nur aus einem Monitor. Es kann Lautsprecher, taktile Rückkopplungsmechanismen und vieles mehr enthalten. Ein erfolgreiches System einer virtuellen Realität bietet dem Benutzer die Möglichkeit zur Interaktion. Der Benutzer kann bestimmte Sinneseindrücke nicht nur wahrnehmen, sondern die virtuelle Umgebung beeinflussen und verändern (Kim [2005]). Abb. 3.1 zeigt schematisch ein solches System einer virtuellen Realität.

Der Benutzer interagiert durch seine Eigenbewegung oder durch Benutzung verschiedener realer oder virtueller Objekte in der virtuellen Umgebung. Das System einer virtuellen Realität zeichnet die Interaktion des Benutzers über Sensoren auf. Nach der Verarbeitung wird das Anzeigesystem angepasst.

In einem Fahrzeugsimulator wird z.B. eine Autobahnfahrt simuliert. Der Benutzer kann über Monitore die Landschaft und andere Fahrzeuge sehen. Durch Lautsprecher nimmt er Motorengeräusche wahr, oder kann das Martinshorn eines Krankenwagens hören. Es gibt taktile Rückkopplungssensoren für Gas und Bremse, aber auch für die Lenkung. Eine gute Hydraulik im Sitz des Benutzers lässt ihn außerdem positive und negative Beschleunigungen fühlen. Der Benutzer betätigt nun das Gaspedal und interagiert so mit dem System der virtuellen Realität. Dieses zeichnet die Interaktion des Benutzers auf, um das multimodale Anzeigesystem zu aktualisieren. Auf dem Monitor verändert sich die Umwelt nun mit höherer Geschwindigkeit, der Benutzer hat also den Eindruck schneller zu fahren. Dieses Gefühl wird durch die taktilen Rückkopplungsmechanismen verstärkt. Die Motorengeräusche werden lauter, die Radiomusik ist schlechter zu hören.

Für eine lebendige Erfahrung in der virtuellen Welt ist die Präsenz sehr wichtig. Präsenz bedeutet in diesem Zusammenhang in wie weit sich Personen an einen anderen Ort als ihren physikalischen Standort, durch die Effekte der Simulation eines Computersystems, versetzt fühlen. Das Gefühl der Präsenz wird unterstützt durch genaue und reichhaltige Anzeigen (optisch, akustisch, propriozeptisch, vestibulär), den Grad der Interaktion und den eigenen Willen, in die virtuelle Welt einzutauchen. Reichhaltige Anzeigen wie eine große Leinwand mit einem entsprechend großen Sichtfeld (engl.: *field of view* - FOV), verstärken die Präsenz. Allerdings kann die Präsenz dadurch auch verringert werden, da die eigene Mobilität eingeschränkt wird. Ein vor den Augen der Versuchsperson angebrachter kleiner Bildschirm (engl.: *head mounted display* - HMD) verhält sich im Vergleich zur Leinwand genau umgekehrt. Der Benutzer ist mobil, hat

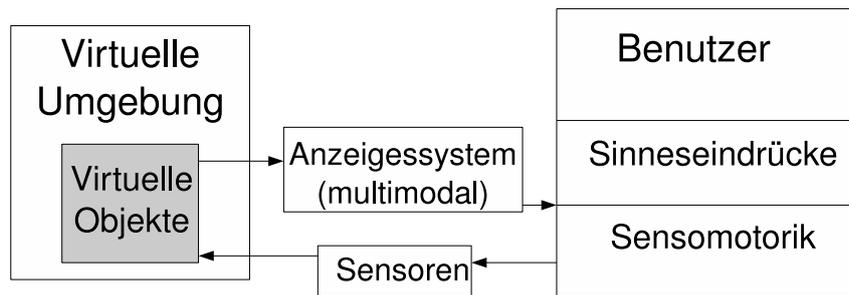


Abbildung 3.1: VR-System: Der Benutzer interagiert mit der virtuellen Umgebung. Die von den Sensoren gemessenen Daten werden weiterverarbeitet und das Anzeigesystem damit aktualisiert, um die Sinneseindrücke des Benutzers zu verändern.

aber ein eingeschränktes Sichtfeld. Daher ist es mit den heutigen technischen Methoden und Möglichkeiten unmöglich einen Benutzer glauben zu machen, die virtuelle Welt sei real oder perfekt (Kim [2005]).

Trotzdem kann man in einer virtuellen Realität Dinge tun, die in Wirklichkeit sehr schwierig oder gar unmöglich sind, zum Beispiel die Antarktis oder den Mond betreten. Eine virtuelle Realität findet daher bei der Ausbildung, z.B. Pilotenausbildung, im Vergnügungsbereich und auch für Experimente eine immer größere Anwendung.

3.1 Entwicklung einer virtuellen Versuchsumgebung

Ein System einer virtuellen Realität zu entwickeln ist keine einfache Aufgabe. Man benötigt viel Detailwissen. Überwachungsverfahren (engl.: *tracking*) können die Bewegungen des Benutzers aufzeichnen. Dabei ist es anwendungsabhängig, ob die Bewegung des ganzen Körpers oder einzelner Körperteile, z.B. Kopf oder Hände, verfolgt werden. Für dreidimensionale Bilder mit einem guten Tiefeneindruck können stereoskopische Anzeigen benutzt werden, die genau auf den Benutzer eingestellt werden müssen. Allgemein benötigt man viel Wissen über Computergrafik und Simulationstechniken. Man sollte genau wissen, welche technischen Geräte man zur Verfügung hat und ob die Leistung dieser Hardware mit den spezifischen Ansprüchen zusammen passt. Für aufwändige 3-D Grafiken wird auch ein leistungsfähiger Rechner benötigt. Die Ressourcen des Rechners müssen sinnvoll eingesetzt werden und dürfen nicht durch schlechte oder voreilige Programmierung vergeudet werden. Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung eines Systems der virtuellen Realität ist die Anforderung hinsichtlich Echtzeit. Das System muss stets innerhalb bestimmter zeitlicher Grenzen auf Eingaben des Benutzers, z.B. Bewegungen, reagieren und die Umgebung dementsprechend realitätsnah verändern. Trotz Echtzeit soll die Umwelt so real wie möglich modelliert werden und die physikalischen Eigenschaften eines Objekts stimmig sein (Kim [2005]).

Um Software immer wieder auf ihre Anforderungen und Leistungen prüfen zu können, sollte sie in verschiedenen Phasen entwickelt werden. Die ersten Wiederholungen sollten die gewöhnlichen Aspekte prüfen. Dazu gehört die Analyse der Anforderun-

gen, die Identifizierung der Objekte und deren Eigenschaften, die Klassenhierarchie, ein grobes Systemverhalten, die Modellierung der Benutzeraufgaben u.ä. Daher kann der Prozess zur Entwicklung eines Systems der virtuellen Realität als klassische Spirale der Softwareentwicklung angesehen werden, siehe Abbildung 3.2 übersetzt nach Kim [2005].

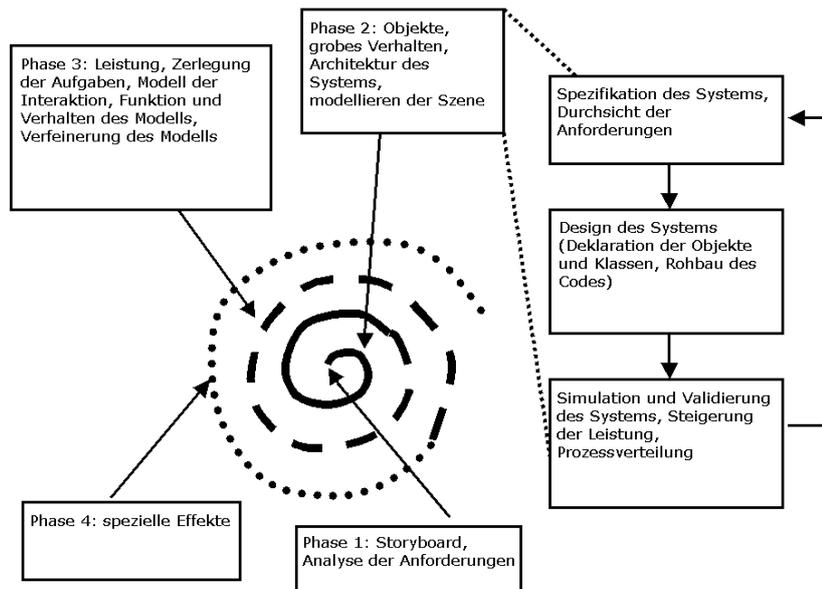


Abbildung 3.2: Spiralenmodell der Softwareentwicklung eines VR-Systems nach Kim [2005].

In Phase 1 beginnt man üblicherweise die Anforderungen an die virtuelle Umgebung zu analysieren und den Gesamtfluss grob zu skizzieren. Dabei müssen die Eigenschaften der Interaktion berücksichtigt werden, aber auch die zeitlichen Anforderungen und Abfolge der Interaktionen. Wichtige Ein-/Ausgabegeräte und die Rechenleistung sollten eingeschätzt werden. Darauf aufbauend werden in Phase 2 die größten virtuellen Objekte modelliert und die Bildgeometrie entworfen. Das Verhalten wird in ein Programm integriert, dabei werden die virtuellen Objekte zu einer Szene angeordnet, die mit einer bestimmten Bildfrequenz, z.B. 20 Hz, angezeigt wird. Spezielle Sensoren oder Anzeigen werden mit dem System verbunden. In Phase 3 wird das System verfeinert, verschiedene Interaktionen werden analysiert und Schnittstellen für diese Interaktionen bereitgestellt. Dadurch wird aus dem Modell für Benutzeraufgaben ein Interaktionsmodell. Auch ein geometrisches, detailgetreues Modell (engl.: *level of detail* - LOD) muss angepasst werden. Viele Simulationen können dazu beitragen wichtiges Verhalten von Objekten zu überprüfen und zu berichtigen, sowie die Leistung abzuschätzen und gegebenenfalls zu steigern. In der letzten Wiederholungsphase (Phase 4 der Entwicklungsspirale) können spezielle Effekte, die das gegenwärtige Empfinden verbessern, möglicherweise eingefügt werden.

3.2 Vorteile bei der Benutzung einer virtuellen Realität

In Schoch [2009] wurde eine erweiterte Dreiecksvervollständigung zur Untersuchung der Wegintegration benutzt. Abbildung 2.2 auf Seite 5 zeigt das Standardparadigma zur Dreiecksvervollständigung. Zu den Punkten Startpunkt (S), A und B kommen noch zwei weitere Punkte (C und D) hinzu. Durch diese fünf Punkte werden fünf Dreiecke aufgespannt. Das erste Dreieck wurde schon in der üblichen Dreiecksvervollständigung benutzt. Am Endpunkt (B) des ersten Dreiecks folgte eine Zeigeaufgabe zum Startpunkt (S) zurück. Danach wird Punkt B zum neuen Startpunkt des sich anschließenden Dreiecks BCD , am Endpunkt (D) folgt wieder eine Zeigeaufgabe, diesmal zu Punkt B. Dementsprechend sind die Aufgaben für die Dreiecke DSA , ABC und CDS .

Dieser Versuch wurde bereits in der realen Welt in einem Parkhaus durchgeführt. Der Versuchsleiter ging dabei zuerst den Weg vom Startpunkt zu Punkt A vor, die Versuchsperson musste folgen. Die zweite Strecke führte von Punkt A zu Punkt B. Nachdem die Versuchsperson an Punkt B angekommen war, sollte sie auf den Startpunkt zurückzeigen. Da sie diese Strecke niemals gegangen ist, ist sie unbekannt und neuartig. Trotzdem sollte sie durch Wegintegration dazu in der Lage sein, siehe dazu Abschnitt 2.1 auf Seite 3. Das Zurückzeigen wurde durch einen Kompass realisiert, auf dessen Deckel ein Papierpfeil angebracht wurde. Die Versuchsperson drehte den Papierpfeil in die angenommene richtige Position, danach öffnete der Versuchsleiter den Kompass und konnte die Gradzahl ablesen und daraus die Abweichung ermitteln. Danach folgten die weiteren Dreiecke. Die Methode, der Versuchsleiter geht zwei Strecken vor, die Versuchsperson folgt und zeigt anschließend auf den jeweiligen Startpunkt, bleibt dabei immer gleich. Da der Versuch in einem Parkhaus stattfand, konnte der Kompass keine richtige Richtung angeben, weil das Magnetfeld der Erde durch die Stahlträger abgelenkt wurde. An jedem Endpunkt im Parkhaus musste daher die Sollrichtung vorher gemessen werden. Die gezeigte Richtung musste abhängig von der Sollrichtung ermittelt werden. Dies erschwerte unnötig die Auswertung der Ergebnisse.

Benutzt man eine virtuelle Umgebung treten solche Probleme nicht auf. Um der Versuchsperson den Weg zu zeigen wird kein Versuchsleiter benötigt, der die Versuchsperson führt. Man kann die Positionen z.B. durch eine Plattform oder Säule anzeigen, die danach wieder verschwinden. Die Zeigemethode lässt sich auch vereinfachen, man kann z.B. einen stilisierten Kompass benutzen oder die Richtung durch eine Art Spiegel anzeigen lassen (siehe Abschnitt 4.4 über verschiedene Zeigemethoden).

Die Position und die Blickrichtung der Versuchsperson kann leicht mit bildverarbeitenden oder elektromagnetischen Überwachungsverfahren nachvollzogen werden. Dadurch wird einfaches Schauen in eine bestimmte Richtung zu einer Zeigemethode.

In einem Parkhaus sind viele Landmarken zu finden, an denen man sich zusätzlich orientieren kann, zum Beispiel die Stützpfeiler, die Abgrenzungen der Parkplätze, Wände oder eine entfernte Häuserfront. Daher dient nicht die Wegintegration als einziges Hilfsmittel zur Richtungsabschätzung und Raumorientierung, sondern auch die Konfiguration der Landmarken wird als Informationsquelle hinzugezogen. Man muss auch veränderliche Landmarken, z.B. ein parkendes Auto, eine Baustelle oder Musik von einem entfernten Rummel, miteinbeziehen, da sie vor- oder nachteilig sein könnten.

In einer virtuellen Umgebung kann man diese Komplikationen ausschließen, indem man ein landmarkenfreies Gebiet modelliert, z.B. eine punktsymmetrische Insel. Dies gewährleistet, dass nur die Eigenbewegung und der optische Fluss zur Raumorientierung genutzt werden.

Eine virtuelle Umgebung ist reproduzierbar, da sie nicht vom Wetter oder von Lichteinflüssen abhängig ist. Sie ist frei von stationären und veränderlichen Landmarken. Ein weiterer Vorteil ist der leichte Umgang mit Daten. Während die Versuchsperson am Versuch teilnimmt können viele Daten vom Computer protokolliert werden. Position und Zeit werden aufgezeichnet um eine anschließende statistische Analyse durchzuführen. Das Format der Daten kann so aufgenommen werden, dass keine weiteren Anpassungen mehr nötig sind und alle Daten vollautomatisch weiterverarbeitet und analysiert werden können.

3.3 Zusammenfassung

Kapitel 3 beschäftigte sich mit der Entwicklung der virtuellen Versuchsumgebung. Es ist besonders wichtig ein passendes Programmierkonzept auszuwählen, um ein adäquates virtuelles System zu erstellen. Ein gutes Beispiel hierfür ist das Spiralenmodell der Softwareentwicklung. Dadurch wird es leichter ein virtuelles System zu entwerfen, welches genau den Anforderungen entspricht und die zur Verfügung stehenden Mittel effizient nutzt.

Versuche zur Raumkognition in realen Umgebungen haben mehrere Nachteile (siehe Abschnitt 3.2). Eine reale Umgebung bietet einer Versuchsperson meist zahlreiche Landmarken. Sind diese Landmarken verlässlich, erleichtern sie die Navigation. Dies ist bei der Untersuchung der Wegintegration hinderlich. Andere Landmarken dagegen sind nicht immer konstant, z.B. ein parkendes Auto oder eine Baustelle. Der Versuch ist daher schwer zu reproduzieren. Zusätzlich ist die manuelle Erhebung der Messdaten komplex und somit fehleranfällig. Eine virtuelle Umgebung kann diese Schwierigkeiten vermeiden. Die Anforderungen an ein System der virtuellen Realität sind daher in der vorliegenden Arbeit:

1. Ausschluss verlässlicher Landmarken,
2. Konstanz und Reproduzierbarkeit sowie
3. einfache Datenerhebung und vollautomatische Weiterverarbeitung der Daten.

4 Versuchsaufbau

Auf der Dreiecksvervollständigung aufbauend wurde die *iterierte Dreiecksvervollständigung* von Schoch [2009] entworfen. Diese Methode wurde entwickelt um in einer virtuellen Welt zu untersuchen, ob metrische Informationen der Wegintegration in eine kognitive Karte integriert werden können.

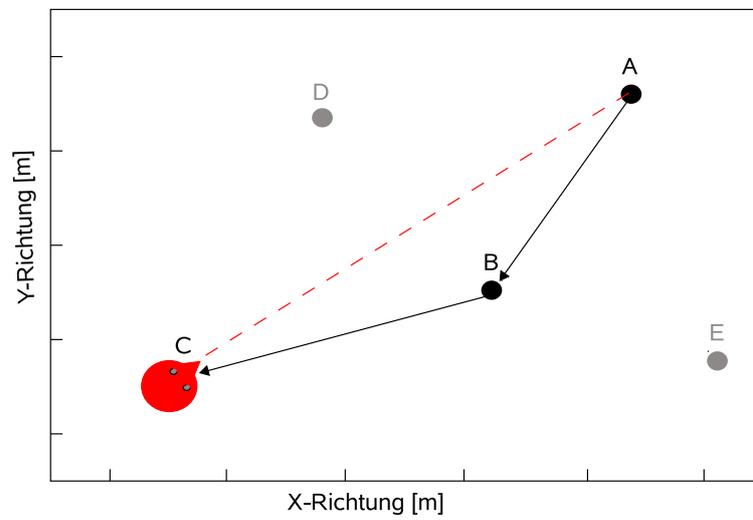
Dazu werden die zur Verfügung stehenden Materialien, um eine virtuelle Welt zu entwerfen, vorgestellt. Um die Versuchsmethoden an die gegebene Hardware anzupassen und das virtuelle System zu verfeinern, wurden mehrere Versuchspersonen angeworben und entsprechend entlohnt. Dabei wurden einige erstellte Versuchsmethoden verworfen oder in ähnlicher Form in den Hauptversuch aufgenommen.

Zuerst wurden die Versuchspersonen auf ihre Fähigkeiten, sich räumlich zu orientieren, getestet. Danach folgte eine Versuchseinführung in die virtuelle Welt. Schließlich wurden Versuchsdaten erhoben, die Hinweise auf metrische Informationen geben könnten.

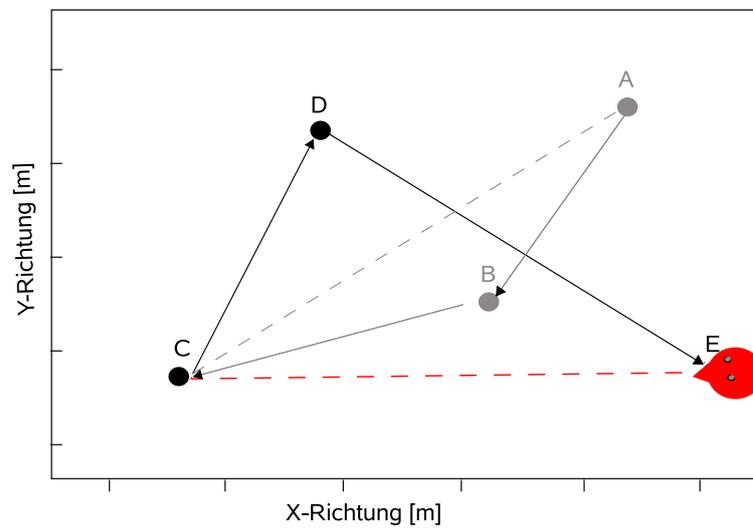
4.1 Iterierte Dreiecksvervollständigung

In Schoch [2009] wird die iterierte Dreiecksvervollständigung vorgestellt. Hierbei werden mehrere Dreiecke miteinander verknüpft, die dann von der Versuchsperson wiederholt abgelaufen werden. Das erste Dreieck wird von Punkt A, Punkt B und Punkt C aufgespannt. Durch die Wegintegration wird beim Ablaufen der Strecken \overline{AB} und \overline{BC} der Heimvektor zu Punkt A ständig aktualisiert. Die Versuchsperson sollte so in der Lage sein, vom Endpunkt C zum Startpunkt A zurückzuzeigen bzw. zurückzugehen. Die Blickrichtung des stilisierten Kopfes in Abb. 4.1(a) zeigt die unbekannte Strecke von Punkt C auf Punkt A. Um den Heimvektor der Versuchsperson zu messen, folgt an jedem Endpunkt eine Zeigeaufgabe zum Startpunkt. Das nächste Dreieck beginnt bei Punkt C und geht über Punkt D zu Punkt E (siehe Abb. 4.1(b)). Auch hier sollte die Versuchsperson in der Lage sein, die Zeigeaufgabe vom Endpunkt E zum Startpunkt C zu bewältigen. Das nächste Dreieck wird von den Punkten E, A und B beschrieben. Danach folgt Dreieck BCD und schließlich DAB. Insgesamt sind so fünf verschiedene Dreiecke entstanden. Jeder Punkt wird dabei als Startpunkt, Endpunkt und Wegpunkt benutzt. Die Wege, welche die Versuchsperson gehen muss, zeigt Abb. 4.1(c). Die zu zeigenden Strecken, welche die Versuchsperson nicht geht, aber aufgrund der Wegintegration kennen müsste, zeigt Abb. 4.1(d).

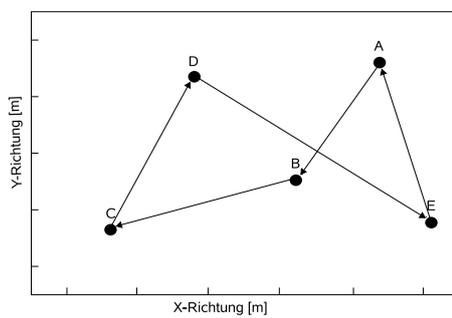
Der Vorteil der iterierten Dreiecksvervollständigung ist natürlich die Wiederholung. Kann die im Heimvektor enthaltene Information durch die Wiederholung gespeichert werden, so kann sie wiederverwendet und vor allen Dingen verbessert werden. Da jeder Punkt als Start-, Ziel- und Wegpunkt genutzt wird, wird er aus verschiedenen Richtungen angesteuert und betrachtet. Diese zusätzliche Information kann eventuell wieder in den Aufbau des jeweiligen Heimvektors einfließen und ihn weiter ver-



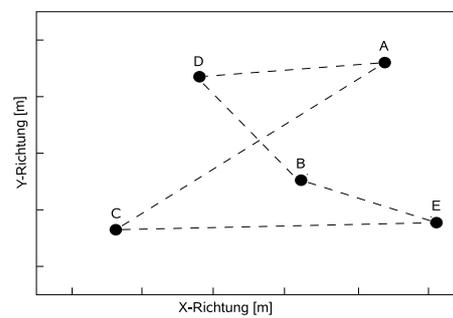
(a) erstes Dreieck



(b) zweites Dreieck



(c) bekannte Pfade



(d) unbekannte Pfade

Abbildung 4.1: Iterierte Dreiecksvervollständigung: Mehrere Dreiecke werden miteinander verknüpft.

bessern. Die aus den verschiedenen Richtungen entstandenen Repräsentationen sollen eine kognitive Karte aufbauen. Wird die Repräsentation der Umwelt durch die Wiederholungen genauer, so kann man das durch eine Lernkurve nachweisen. Stimmen diese Annahmen und lassen sie sich durch dieses oder andere Experimente belegen, so erhält man einen Hinweis auf metrische Informationen in kognitiven Karten.

4.2 Reale Umgebung

Um eine Navigation anhand von Landmarken auszuschließen wurde die Methode der iterierten Dreiecksvervollständigung für eine virtuelle Umgebung entwickelt. Dazu wurde das VR-Labor der Fakultät für Biologie am Lehrstuhl für kognitive Neurowissenschaft in Tübingen benutzt. Das VR-Labor ist 8×6 m groß. Es ist insgesamt mit sechs Infrarot-Kameras ausgestattet, die eine Fläche von 5×4 m überwachen (engl.: *tracking*). Die Infrarot-Kameras verfolgen dabei jedes reflektierende Objekt. Obwohl die Infrarot-Kameras an der Decke hängen, können sie nicht die ganze Höhe des Raumes ausnutzen. Sie sind nach unten geneigt um eine größere Bodenfläche abzudecken. Es befindet sich außerdem ein Überwachungsrechner im Raum, der die Daten der Infrarot-Kameras verarbeitet. Die Versuchsperson trägt die Versuchsausrüstung auf dem Rücken und auf dem Kopf. Eine Zusammenfassung der Versuchsausrüstung findet sich auch in Anhang D.

Auf dem Kopf trägt die Versuchsperson ein HMD mit einem Gesichtsfeld von 60° diagonal. Es eignet sich für Kontaktlinsen- aber auch für Brillenträger mit einer Sehstärke bis zu ± 4 Dioptrien. Am HMD ist eine Halterung für die Reflektorkugeln (engl.: *target*) angebracht. Die fünf Reflektorkugeln, die in bestimmten Winkeln zueinander stehen (siehe Abb. 4.2(a)), geben die Bewegung der Versuchsperson an. Die spezielle Konfiguration der Reflektorkugeln wird von den Infrarot-Kameras registriert und dient dazu drei-dimensionale Bewegungen (vorne-hinten, rechts-links, oben-unten) aufzuzeichnen.

Auf dem Rücken trägt die Versuchsperson einen Laptop (Dell Precision M70 mit nVidia Quadro FX Go 1400) und eine Grafikschnittstelle (1280 x 1024 Pixel, 60 Hz). Beide Geräte sind in einem Gestell montiert, der Laptop kann einfach herausgenommen werden (siehe Abb. 4.2(b)). Auf dem Laptop läuft das mit OpenGL Performer erstellte Programm mit einer Bildrate von 60 Hz. Der analoge Bildausgang (VGA) des Laptops ist mit der Grafikschnittstelle verbunden. Die Grafikschnittstelle ist per digitalen Bildausgang (DVI) mit dem HMD verbunden. Daher kann die Versuchsperson alles sehen, was auf dem Laptopmonitor zu sehen ist.

Die Infrarot-Kameras sind über ein Netzkabel mit dem Überwachungsrechner verbunden. Die Kameras ermitteln mit einer Frequenz von 60 Hz die Positionsdaten der Reflektorkugeln. Über eine kabellose Verbindung werden diese Daten mit 60 Hz an den Laptop gesendet und in das OpenGL Performer Programm eingebettet. So wird das Bild im HMD entsprechend der Bewegung der Versuchsperson aktualisiert.

Die gesamte Versuchsausrüstung wiegt ca. 12 kg (siehe Abb. 4.3). Der Laptop sowie die Grafikschnittstelle sind mit Batterien ausgerüstet, dadurch kann sich die Versuchspersonen frei im Raum bewegen.



(a) Das HMD mit den Reflektorkugeln.



(b) Das Rucksackgestell mit Laptop und Grafikschnittstelle.

Abbildung 4.2: Die Versuchsausrüstung bestehend aus HMD, Reflektorkugeln, Laptop und Grafikschnittstelle.



(a) Eine Versuchsperson von vorne. Zu sehen ist das HMD mit den Reflektorkugeln. Die Kugeln reflektieren hier das Blitzlicht.



(b) Eine Versuchsperson von hinten. Zu sehen ist das Rucksackgestell mit Laptop und Grafikschnittstelle.

Abbildung 4.3: Eine Versuchsperson mit der ca. 12 kg schweren Versuchsausrüstung.

4.3 Virtuelle Umgebung

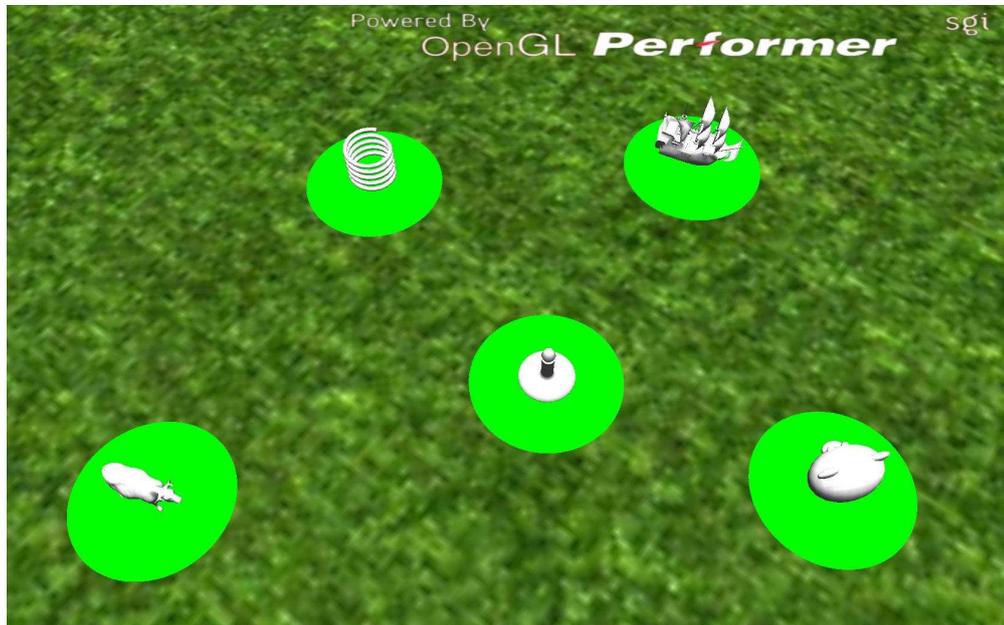
Passend zu der oben genannten Hard- und Software wurde eine virtuelle Versuchsumgebung in OpenGL gestaltet. Dafür wurden die Anforderungen aus Kapitel 3, wie z.B. Reproduzierbarkeit für andere, einfache Datenerhebung und vollautomatische Weiterverarbeitung, berücksichtigt. Die so entstandene landmarkenfreie Arena hat 120 m Durchmesser und besteht aus einem 12-Eck als Grundfläche. Der Hintergrund setzt sich aus einem sich wiederholenden Bergpanorama zusammen, der Untergrund aus einer zufälligen Verteilung grüner Farbflecken, die an Gras erinnern. Die Ecken der Arena sind aufgrund ihrer Weitläufigkeit nicht wahrnehmbar und bieten daher keine Positionshinweise. Weder der Boden, noch die Wände bieten verlässliche Landmarken. In der Arena werden fünf Objekte positioniert, so dass die in Abschnitt 4.1 beschriebene Konfiguration für eine iterierte Dreiecksvervollständigung entsteht (siehe Abb. 4.4). Diese Objekte sind in Grau gehalten. Durch ihre geringe Größe sollen sie den Eindruck von Spielzeug erwecken. Als Objekte wurden ein Schiff, eine Kerze, eine Kuh, eine Spirale und ein Teddybär benutzt. Unter jedem Objekt befindet sich eine runde Plattform. Um die Spielzeuge aus jeder Perspektive gut sehen zu können, schweben die Objekte in 70 cm Höhe über den jeweiligen Plattformen.

Die Objekte werden ausgeblendet, sobald die Versuchsperson näher als 20 cm ist, um ein virtuelles Zusammenstoßen der Versuchsperson mit einem Objekt zu verhindern. Ein virtuelles Zusammenstoßen mit einem Objekt hat bei vorangegangenen Versuchsreihen zu Irritationen bei den Versuchspersonen geführt. Die Plattformen dagegen können immer betreten werden und helfen so eine mittige Position zu finden. Die radialsymmetrischen Plattformen werden genau auf Bodenhöhe platziert (siehe Abb. 4.5(a)).

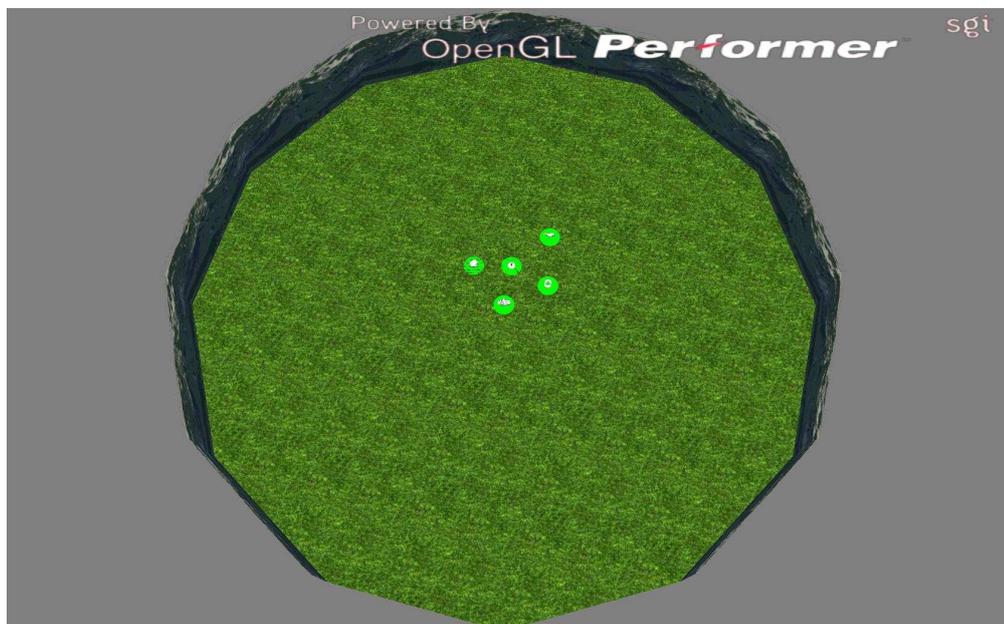
4.4 Entwicklung der Zeigemethoden

Bei der iterierten Dreiecksvervollständigung gehen die Versuchspersonen zuerst von einem Startpunkt über einen Wegpunkt zum Endpunkt. Dort folgt eine Zeigeaufgabe auf den Startpunkt. Die Zeigeaufgabe kann dabei aus mehreren Zeigemethoden bestehen. Dies hat den Vorteil verschiedene Daten zur Auswertung zur Verfügung zu haben. Daher wurden Zeigemethoden entwickelt, die eine Richtung in Grad als Auswertung zulassen, sowie die Position der Versuchsperson erfassen um auch Distanzen auszuwerten. Die verschiedenen Zeigemethoden wurden iterativ verbessert, bis sie leicht und intuitiv für eine Versuchsperson zu bedienen waren.

Das Objekt auf das die Versuchsperson zeigen soll, muss dabei immer ausgeblendet werden. Sonst könnte die Versuchsperson das Objekt ja durch einfaches Drehen des Kopfes sehen und so die Versuchsergebnisse verfälschen. Da die Navigation mithilfe von Landmarken ausgeschlossen werden sollte, müssen während der Zeigeaufgabe auch alle anderen Objekte ausgeblendet werden. Die Versuchsperson sollte die kognitive Karte mit Hilfe der metrischen Informationen aus der Wegintegration aufbauen. Sind alle Objekte bei der Zeigeaufgabe zu sehen, so kann sich die Versuchsperson an diesen Landmarken leicht orientieren, ohne auf die Informationen in der kognitiven Karte zuzugreifen.



(a) Die virtuelle Umgebung: Nahansicht der Objekte.



(b) Die virtuelle Umgebung: Gesamtansicht der Arena.

Abbildung 4.4: Die virtuelle Umgebung aus der Vogelperspektive. Zu sehen sind die Plattformen mit Spielzeugobjekten. Die Konfiguration entspricht Abb. 4.1.

4.4.1 Kompass

Zuerst wurde der Versuchsaufbau von Schoch [2009] implementiert, da die vorliegende Arbeit auf der von Schoch aufbaut. Somit sind beide Arbeit vergleichbar. Schoch benutze in ihrem Versuch, in dem die virtuelle Realität auf eine Leinwand projiziert wird, einen Kompass als Zeigemethode. Damit musste die sitzende Versuchsperson auf das Startobjekt zeigen, welches hinter ihr lag. Sie konnten es also nicht vor sich erkennen, sollte aber aufgrund der Wegintegration in der Lage sein, die Richtung zum Startobjekt anzuzeigen. Der Kompass besteht aus einem 12-Eck mit einem Pfeil. Bei Schoch [2009] wurde der Kompass nahe dem Boden um den Körper herum projiziert, die Nadel geht mitten hindurch. Um die Nadel des Kompasses zu bewegen, wurde ein Joystick benutzt. In dieser Arbeit wurde der Kompass auch auf den Boden, bzw. 1,2 m über den Boden, abgebildet. Mit den Tasten einer Computermaus konnte man den Pfeil des Kompasses drehen. Ein Joystick ist zu unhandlich, um ihn im Stehen zu verwenden.

4.4.2 Spiegel

Nachdem die Versuchsperson die zwei Schenkel eines Dreieckes abgelaufen hat, wird am Endpunkt ein Spiegel auf Augenhöhe eingeblendet. Die Steuerung des Spiegels ist an die Kopfbewegung der Versuchsperson gekoppelt. Sobald diese ihren Kopf dreht, bewegt sich der Spiegel mit, so dass die Versuchsperson immer genau in den Spiegel schaut.

Die Aufgabe der Versuchsperson ist nun mithilfe des Spiegels auf das Startobjekt zu zeigen. Der Spiegel wird dabei wie ein Rückspiegel benutzt. Wenn der Spiegel, der Kopf der Versuchsperson und das Startobjekt auf einer Linie liegen, so wurde die Zeigemethode ideal gelöst.

Der Spiegel zeigt allerdings nur den Untergrund und den Hintergrund, ohne Plattformen und Objekte. Somit muss sich die Versuchsperson die Positionen der Objekte gut eingepägt haben, um eine gute Leistung zu zeigen.

Diese Zeigeaufgabe eignet sich auch besonders gut, um der Versuchsperson Leistungsrückmeldung (engl.: *feedback*) zu geben. Nachdem die Versuchsperson die Zeigemethode Spiegel bewältigt hat, verschwindet der Spiegel nicht, sondern zeigt in der Phase der Leistungsrückmeldung die Objekte, auf welche die Versuchsperson gezeigt hat.

4.4.3 Schauen

Die Zeigemethode Schauen ist für die Versuchspersonen sehr einfach und intuitiv. Hat die Versuchsperson das Endobjekt erreicht, soll sie sich so drehen, dass sie in die Richtung des Startpunkts sieht. Dabei kann sie das Startobjekt sowie alle anderen Objekte natürlich nicht sehen, die Versuchsperson muss sich völlig auf die von der Wegintegration bereitgestellten Informationen verlassen und kann ihre Antwort nicht von Landmarken abhängig machen.

Auch hier ist es leicht eine Leistungsrückmeldung zu bieten. Nachdem die Versuchsperson die Zeigemethode Schauen bewältigt hat, werden allen Objekte wieder sichtbar. Kann die Versuchsperson den Startpunkt vor sich sehen, war ihre Zeigeleistung gut. Ist der Startpunkt aber nur durch eine Drehung des Kopfes zu sehen, war die Zeigeleistung nicht so gut.

4.4.4 Laufen

Die Zeigemethode Laufen ist ebenso einfach und intuitiv wie die Zeigemethode Schauen. Nachdem die Versuchsperson am Endpunkt des Dreiecks steht, läuft sie zum Startpunkt zurück. Bei der Auswertung dieser Methode ist auf die genaue Aufgabenstellung zu achten. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten, entweder die Versuchsperson wird dazu angehalten, sich zuerst in die Richtung zu drehen und dann möglichst geradlinig die Distanz zum Startpunkt zurückzulegen, oder die Versuchsperson kann direkt losgehen, ohne sich zunächst auszurichten. Im zweiten Fall sind die verschiedenen Winkel zu beachten. Der Winkel zwischen der zuerst eingeschlagenen Strecke und der Verbindung der beiden Punkte ist unterschiedlich zu dem Winkel mit dem die Versuchsperson am Punkt eintrifft.

Danach werden alle Objekte wieder eingeblendet, um so eine Leistungsrückmeldung zu geben. Kann die Versuchsperson nun unter sich eine Plattform erkennen, so war ihre Zeigeleistung gut.

Die Zeigemethode Laufen ist besonders wichtig, da nicht nur Winkel eingehen, sondern auch Distanzen. Bei den Zeigemethoden Kompass, Spiegel und Schauen kann nur der gezeigte Winkel ausgewertet werden. Bei der Zeigemethode Laufen kann die angezeigte Position zusätzlich ausgewertet werden.

4.4.5 Auswahl der Zeigemethoden für den Hauptversuch

Die Zeigemethode Kompass wurde nicht in den Hauptversuch integriert. Obwohl diese Zeigemethode an der Leinwand sehr gut funktionierte, eignete sie sich nicht für den Versuch mit einem HMD. Wird der Kompass mit Pfeil auf den Boden projiziert, treten die Versuchspersonen mehrere Schritte zurück, um ihn besser wahrnehmen zu können. Aus diesem Grund können viele Seiteneffekten auftreten, welche die Versuchsergebnisse verfälschen. Die Versuchsperson steht nun nicht mehr auf dem Endobjekt, die angegebene Richtung kann durch diese neue Position verfälscht werden. Genauso verhält es sich, wenn der Kompass vor der Versuchsperson auftaucht. Entweder die Versuchsperson schätzt die Richtung von ihrer eigenen Position aus, oder von der Position des Kompasses aus. Die Richtungen unterscheiden sich dabei um einige Grad. Wird der Kompass 1,2 m über dem Boden abgebildet, so geht der Pfeil des Kompasses mitten durch den Körper der Versuchsperson. Obwohl die Versuchspersonen ihren eigenen Körper in der virtuellen Welt nicht sehen kann, wird dieses Durchstoßen als sehr störend wahrgenommen. Die Versuchspersonen treten wieder einige Schritte zurück und die gleichen, oben genannten Seiteneffekte treten auf.

Außerdem ist die Bewegung der Kompassnadel schwierig für die Versuchsperson. Die linke, bzw. rechte Taste einer Computermaus bewegen die Kompassnadel nach links, bzw. rechts. Um der Versuchsperson ein genaues Zeigen auf das Startobjekt zu ermöglichen, bewegt ein Mausklick die Kompassnadel um $0,5^\circ$. Um einen großen Winkel einzustellen, braucht die Versuchsperson also relativ lang und könnte so ungeduldig werden.

Die Zeigemethoden Spiegel, Schauen und Laufen wurden in den Hauptversuch integriert und zu einer Zeigeaufgabe zusammengefasst. Erreicht die Versuchsperson den Endpunkt, erscheint der Spiegel automatisch in Augenhöhe vor ihr und alle Objekte und Plattformen werden ausgeblendet. Sie benutzt den Spiegel wie einen Rückspiegel

und stellt ihn auf das Startobjekt ein. Die Position des Spiegels wird mit der mittleren Taste der Computermaus bestätigt. Die Versuchsperson erhält nun eine Leistungsrückmeldung im Spiegel, die sie wieder mit dem Betätigen der mittleren Maustaste bestätigt. Der Spiegel verschwindet und die Zeigemethode Schauen schließt sich an. Hat sich die Versuchsperson so gedreht, dass sie den Startpunkt ansieht, wird die Blickrichtung wieder mit der mittleren Maustaste bestätigt. Danach schließt sich die Zeigemethode Laufen an, die Versuchsperson läuft also zum Startobjekt und bestätigt ihre Position wieder. Die Zeigeaufgabe ist damit abgeschlossen und der Versuch setzt sich mit dem nächsten Dreieck fort, alle Objekte sind sichtbar. Die Versuchsperson kann sich nun umschauchen um ihre Zeigeleistung abzuschätzen. Die Versuchsperson steht im Idealfall auf dem alten Startpunkt. Kann sie z.B. den Startpunkt vor sich sehen, hat sie die Entfernung unterschätzt. Ist er vor und neben der Versuchsperson, so sind Entfernungs- und die Richtungsschätzung fehlerhaft. Kann die Versuchsperson allerdings unter sich die Plattform erkennen, so war die Leistung gut.

Danach muss sie zum neuen Startpunkt, dem alten Endpunkt, laufen. Am Startpunkt ankommen, läuft sie über den Wegpunkt zum Endpunkt, wo die Zeigeaufgabe bestehend aus den drei Zeigemethoden Spiegel, Schauen und Laufen, erneut ausgeführt wird.

4.5 Versuchsablauf

Zuerst füllen die Versuchspersonen einen Fragebogen aus und nehmen an einem perspektivischen Wahrnehmungstest teil. Anschließend sollen sie eine Versuchsbeschreibung lesen. Nachdem die Versuchsausrüstung angelegt wurde, folgt eine kurze Einführung in die virtuelle Realität und den Hauptversuch. Hat die Versuchsperson die iterierte Dreiecksvervollständigung in virtueller Realität beendet, so wird ihr die Versuchsausrüstung abgenommen. Als letztes soll sie eine Karte der Objekte anfertigen, bevor sie entlohnt wird. Insgesamt dauert der Versuch etwa eine Stunde.

4.5.1 Versuchspersonen

An dem Versuch nahmen 25 Versuchspersonen teil, lediglich drei davon waren aufgrund des hohen Gewichts der Versuchsausrüstung weiblich. Die Versuchspersonen erhielten eine Aufwandsentschädigung. Die Versuchspersonen waren entweder Studierende oder Angestellte zwischen 21 und 55 Jahre. Das Durchschnittsalter betrug 27 Jahre. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder trugen korrigierende Sehhilfen innerhalb der zulässigen Grenzen des HMD. Es wurden jeweils fünf Runden durchgeführt, auf jedes Objekt wurde fünf Mal gezeigt. Vor dem Versuch mussten alle Versuchsteilnehmer an einem perspektivischen Wahrnehmungstest (PTA-Test) teilnehmen, der die räumliche Orientierungsfähigkeit erfasst, und eine Versuchsbeschreibung lesen (siehe Anhang A). Danach wurden sie in einer Versuchseinführung an die virtuelle Realität und die Versuchsanforderungen gewöhnt. Es wurden die Zeigemethoden Spiegel, Schauen und Laufen verwendet. Alle Versuchspersonen haben den Versuch in der virtuellen Realität bewältigt. Zum Schluss sollten die Versuchspersonen eine Karte der Objekte anfertigen.

4.5.2 PTA-Test

Bevor der Versuch in der virtuellen Umgebung beginnt, müssen alle Versuchspersonen an einem perspektivischen Wahrnehmungstest (engl.: *perspective taken ability test* - PTA) der Firma MM Virtual Design LCC teilnehmen. Dieser Test soll die Fähigkeit zur Orientierung im Raum erfassen (Kozhevnikov et al. [2006]). Am Ende wird ein Wert ausgegeben, der sich aus den Fehlern und der Reaktionszeit der Versuchsperson berechnet. Ab 20 wird der Versuchsperson eine durchschnittliche Orientierungsleistung zugeschrieben. Der PTA Wert lag bei den Versuchspersonen zwischen 14 und 40 und beträgt im Durchschnitt 25. Eine genaue Beschreibung des PTA befindet sich in Anhang F.

4.5.3 Versuchseinführung

Um die Versuchspersonen an die Versuchsausrüstung und die virtuelle Versuchsumgebung zu gewöhnen, wurde eine virtuelle Versuchseinführung entworfen. In derselben Arena wie im Hauptversuch werden vier Landmarken positioniert, jede Landmarke ist ein Spielzeugobjekt. Die Landmarken sind so positioniert, dass sie jeweils in den äußeren Ecken des realen Raums stehen, den die Infrarot-Kameras abdecken. Diese strenge geometrische Anordnung hat einen wichtigen Vorteil. Die Versuchspersonen bewegen sich hier immer am Rande des Überwachungsbereichs. Wenn die Infrarot-Kameras immer ihre Position verfolgen können, ohne dass Messausfälle entstehen, so ist dies auch im Hauptversuch so. Die Versuchsperson bewegt sich konzentriert und zielstrebig, ohne z.B. das Ende der Arena zu suchen o.ä. Die Körpergröße zusammen mit den Reflektorkugeln ist auch in den Ecken nicht zu hoch für die Infrarot-Kameras. In der Versuchseinführung können die Versuchspersonen noch Fragen stellen, sollte ihnen etwas unklar sein. Dies ist im Hauptversuch untersagt, daher muss jeder Versuchsperson die exakte Versuchsabfolge bekannt sein. Es wird zuerst jede Zeigemethode (siehe Abschnitt 4.4.2-4.4.4) einmal einzeln trainiert. Danach werden die Zeigemethoden kombiniert und fünf Mal geübt. Sollten danach immer noch Unsicherheiten bei der Versuchsperson auftreten, so wird die Versuchseinführung wiederholt. Damit jede Versuchsperson die gleichen Informationen hat, werden Fragen und Hilfestellungen des Versuchsleiters vorgelesen. Ein beispielhaftes Gespräch zwischen Versuchsleiter und Versuchsperson findet sich in Anhang A.

4.5.4 Aufgaben der Versuchsperson in der virtuellen Realität

Die Versuchsperson soll in der virtuellen Umgebung die iterierte Dreiecksvervollständigung und mehrere Zeigemethoden bewältigen. Dabei werden mit einer Frequenz von 60 Hz die x/y Position der Versuchsperson, sowie die Roll-Nick-Gier-Winkel (engl.: *roll-pitch-yaw*) in eine Datei zur späteren Auswertung geschrieben.

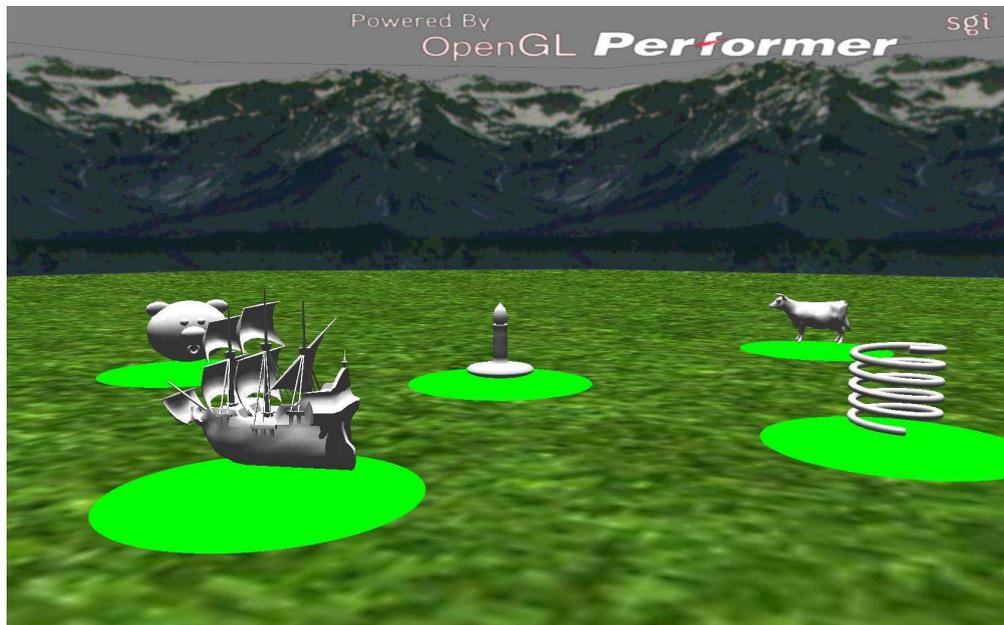
Zuerst geht die Versuchsperson, wie unter Abschnitt 4.1 beschrieben, von Objekt A über Objekt B zu Objekt C (siehe dazu auch Abb. 4.1(a) auf Seite 16). Danach folgt die Zeigaufgabe, die aus drei Zeigemethoden besteht. Damit die Versuchsperson weiß, was Objekt A, B oder C ist, erscheint am jeweiligen Punkt eine 10 m hohe Säule. Bei der Zeigaufgabe, wird als Hilfestellung immer unten links im Bild des HMD ein kleines Bild des Startobjekts eingeblendet (siehe Abb. 4.5(b)-4.5(d)). So kann sich die

Versuchsperson leicht an das Startobjekt erinnern, auf das sie zeigen muss. Es folgen die drei Zeigemethoden Spiegel, Schauen und Laufen, die in Abschnitt 4.4.2-4.4.4 ausführlich beschrieben wurden. Um der Versuchsperson die Reihenfolge der Zeigemethoden anzuzeigen wird unten rechts im Bild des HMD bei den Zeigemethoden Schauen und Laufen eine Hinweistafel eingeblendet (siehe Abb. 4.5(d)). Bei der Zeigemethode Schauen kann die Versuchsperson den Text *Schaue zum Startobjekt* lesen, bei der Zeigemethode Laufen *Laufe zum Startobjekt*. Jede Zeigemethode muss die Versuchsperson durch Betätigen der mittleren Taste einer Computermaus abschließen. Sie bestätigt erst die Einstellung des Spiegels (siehe Abb. 4.5(b)), danach die Leistungsrückmeldung (siehe Abb. 4.5(c)), die Blickrichtung der Zeigemethode Schauen (siehe Abb. 4.5(d)) und schließlich die Position der Zeigemethode Laufen. Bei jedem Mausklick werden automatisch die x/y - Position der Versuchsperson, sowie die Roll-Nick-Gier-Winkel in eine zweite Datei zur späteren Auswertung geschrieben. Ist die Zeigeaufgabe beendet, wird Objekt C zum neuen Startpunkt und Objekt E zum neuen Endpunkt der folgenden Dreiecksvervollständigung (siehe Abb. 4.1(b)). Da die Versuchsperson nach der Zeigemethode Laufen im Idealfall auf Objekt A steht, muss sie zuerst zum neuen Startobjekt C laufen. Einen genauen Versuchsablauf zeigt Tabelle E.1. Nach fünf Durchgängen, d.h. es wurde auf jedes Objekt genau fünf mal gezeigt, endet der Versuch in der virtuellen Versuchsumgebung. Es wird ein Hinweisschild eingeblendet, um sich an der Teilnahme am Experiment zu bedanken und der Versuchsperson anzuzeigen, dass der Versuch beendet ist. Der Versuchsperson wird die Versuchsausrüstung abgenommen. Danach soll die Versuchsperson zusätzlich eine Karte der virtuellen Versuchsumgebung zeichnen. Die Genauigkeit der Karte kann Hinweise auf die Informationen geben, die im räumlichen Langzeitgedächtnis gespeichert sind.

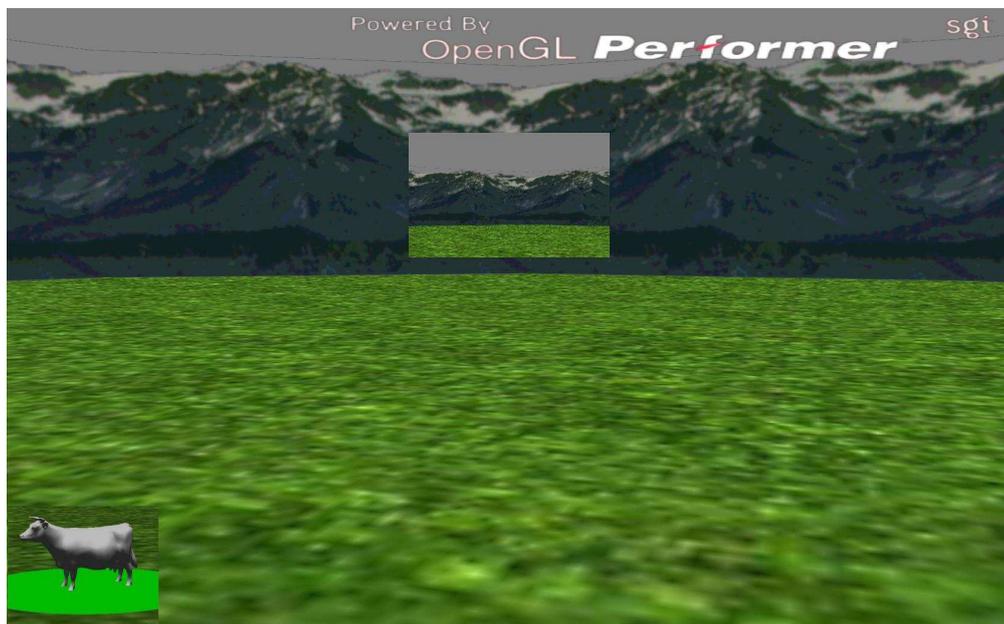
Die Wahl von drei verschiedenen Zeigemethoden hat mehrere Vorteile. Durch diese komplexe Aufgabe wird der Versuchsperson wahrscheinlich nicht so schnell langweilig, so dass sie bis zum Ende motiviert und konzentriert bleibt. Es kann mitten im Versuch Leistungsrückmeldung gegeben werden. Die Versuchsperson kann sich so neu orientieren und fehlerhafte Richtungsanzeigen korrigieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass nicht nur die Richtung, in der die Versuchsperson ein Objekt vermutet, abgefragt werden kann, sondern auch die Entfernung zu diesem Objekt. Durch die Wiederholungen und die Leistungsrückmeldung könnte sich in der Versuchsauswertung eine Lernkurve zeigen. Eine Lernkurve würde auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis hindeuten.

4.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel 4 beschäftigte sich ausführlich mit der Umsetzung der in Kapitel 2 und Kapitel 3 erarbeiteten Grundlagen. Die iterierte Dreiecksvervollständigung beschreibt eine Methode um eventuell Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu erhalten. Dazu wurde ein Versuch in einer virtuellen Umgebung mit OpenGL entworfen. Ein HMD erlaubt es der Versuchsperson sich frei im Raum zu bewegen. Die Positionsdaten werden von Infrarot-Kameras bestimmt und über W-LAN übertragen. Die Zeigemethode wurde weiterentwickelt und der virtuellen Umgebung angepasst. Das endgültige Versuchsdesign umfasst eine Zeigeaufgabe

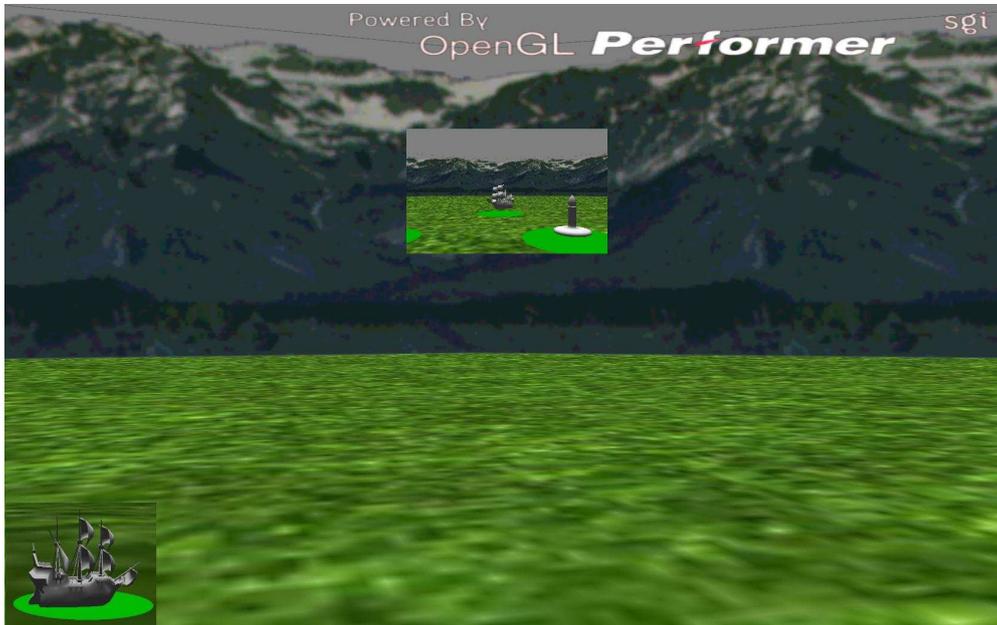


(a) Die virtuelle Umgebung aus der Sicht einer Versuchsperson.



(b) Der Spiegel muss benutzt werden. Links unten in der Ecke befindet sich eine Erinnerung an das Objekt, auf welches gezeigt werden soll.

Abbildung 4.5: Die virtuelle Umgebung aus der Sicht einer Versuchsperson vor und während der Zeigeaufgaben.



(c) Der Spiegel zeigt eine Leistungsrückmeldung. Hier wurde eine gute Leistung erzielt.



(d) Unten rechts kann die Versuchsperson die nächsten Zeigeaufgaben ablesen.

Abbildung 4.5: Die virtuelle Umgebung aus der Sicht einer Versuchsperson vor und während der Zeigeaufgaben.

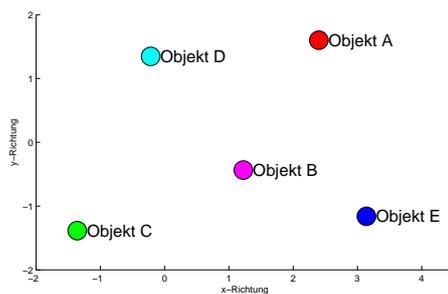
mit drei verschiedenen Zeigemethoden. Die Zeigemethode Spiegel, Schauen und Laufen sind jeweils intuitiv und einfach mit dem Körper zu bedienen. Eine Maus dient dazu die Richtungs- bzw. Positionswahl der Versuchsperson zu bestätigen.

Im nächsten Kapitel wird der Versuch ausgewertet. Verbessert sich die Zeigeleistung der Versuchspersonen nach mehreren Durchgängen, so gibt dies Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis.

5 Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung der Rohdaten. Um Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu finden, müssten die Versuchspersonen durch die iterierte Dreiecksvervollständigung die Position der fünf Objekte gelernt haben. Demnach sollten sie in der Lage sein auf diese Objekte zu zeigen, bzw. zu ihrer Position zu gelangen. Die anschließend gezeichnete Karte sollte einer geografischen Karte entsprechen. Die Winkel und Distanzen sollten also euklidisch sein.

Alle Objekte haben in den folgenden Abbildungen eine Farbkodierung (siehe Abb. 5.1). Rot entspricht Objekt A, rosa Objekt B, grün Objekt C, hellblau Objekt D und blau Objekt E.



| Objekt | Farbe | Spielzeug |
|--------|----------|-----------|
| A | rot | Schiff |
| B | rosa | Kerze |
| C | grün | Kuh |
| D | hellblau | Spirale |
| E | blau | Teddy |

(b) Objekte mit Farbkodierung

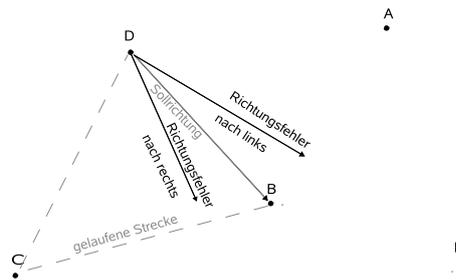
(a) Räumliche Anordnung der Objekte mit Farbkodierung

Abbildung 5.1: Farbkodierung der Objekte

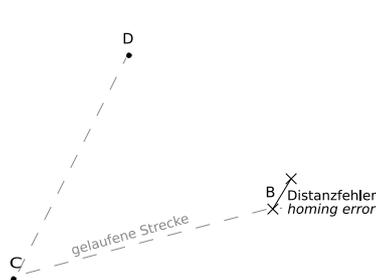
Die Versuchspersonen sollen in einer virtuellen Umgebung die iterierte Dreiecksvervollständigung bewältigen. Um den Heimvektor, der durch Wegintegration ständig aktualisiert wird, anzuzeigen, werden drei Zeigemethoden benutzt. Nachdem die Versuchsperson fünfmal auf jedes Objekt gezeigt hat, endet der Versuch. Eine genaue Beschreibung der Aufgaben findet sich in Abschnitt 4.5.4 (Seite 24). Eine tabellarische Übersicht zeigt Tabelle E.1 (Seite 71).

Für die Auswertung wird die Position der Versuchsperson in x/y - Koordinaten benötigt, sowie die Blickrichtung in Grad. Bei den Zeigemethoden Spiegel und Schauen kann ein Richtungsfehler auftreten (siehe Abb. 5.2(a)). Die Versuchspersonen können rechts oder links am Objekt vorbei zeigen, dies wird im Folgenden als Richtungsfehler bezeichnet. Wird links am Objekt vorbei gezeigt, so hat der Richtungsfehler ein negatives Vorzeichen. Zeigt man rechts vorbei, ist das Vorzeichen positiv. Desweiteren wird noch der absolute Fehler betrachtet. Dieser ist vorzeichenlos, er entspricht dem Betrag

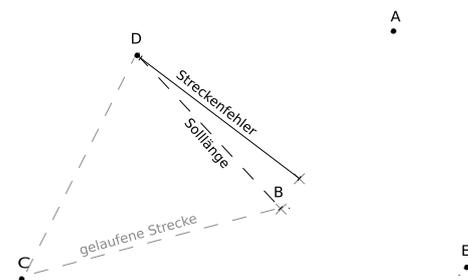
des Richtungsfehlers. Bei der Zeigemethode Laufen kann ein Positionsfehler, bestehend aus x/y - Koordinaten, auftreten. Aus diesem Positionsfehler lassen sich weitere Auswertungsdaten berechnen. Die euklidische Distanz zwischen der Position des Objektes und der Position der Versuchsperson wird hier als Distanzfehler (engl.: *homing error*) bezeichnet (siehe Abb. 5.2(b)). Zusätzlich kann man noch einen Streckenfehler berechnen, über die Strecke welche die Versuchsperson zurückgelegt hat. Ist die Strecke, welche die Versuchsperson zwischen Ziel- und Startobjekt zurückgelegt hat, länger als die eigentliche Sollstrecke, wurde die Länge überschätzt. Ist die überbrückte Distanz kürzer, wurde die Länge unterschätzt (siehe Abb. 5.2(c)).



(a) Mögliche Richtungsfehler



(b) Distanzfehler: Abstand zwischen Objektposition und Position der Versuchsperson.



(c) Streckenfehler: Strecke, welche die Versuchsperson zurückgelegt hat, weicht von der Sollstrecke ab.

Abbildung 5.2: Mögliche Fehler der Versuchspersonen, zu sehen sind Richtungsfehler, Distanzfehler und Streckenfehler.

5.1 Vorverarbeitung der Daten

Mehrere Versuchspersonen mussten ausgeschlossen werden, da sie nicht am Hauptversuch teilnahmen, sondern an einer Auswahl der Zeigemethode Kompass, bzw. den Zeigemethoden Schauen oder Laufen. Die Versuchsergebnisse einer weiblichen Testperson konnten für die Auswertung nicht berücksichtigt werden, da ein kompletter Systemabsturz auftrat. Der Ausschluss einer weiteren, diesmal männlichen Versuchsperson resultierte aus ihrem subjektivem Empfinden, dass die Objekte ihre Position immer veränderten. Dies entspricht nicht der Wahrheit. Dieser Versuchsperson war es nach eigener Aussage unmöglich eine gute Leistung zu erbringen. Drei weitere Versuchspersonen wurden ausgeschlossen, da ihre Zeigefehler dreimal schlechter waren, als

die der übrigen Versuchspersonen (ANOVA, $p \ll 0,01$). Das schlechte PTA Ergebnis (< 20) der erwähnten Versuchspersonen bekräftigt diese Entscheidung.

Zur Auswertung bleiben 16 Versuchspersonen. Das Durchschnittsalter beträgt dabei 27,25 Jahre mit einer Varianz von 8 Jahren. Der durchschnittliche PTA Wert ist 26,8 mit einer Varianz von 5.

5.2 Visualisierung der Rohdaten

Zuerst werden einige Beispiele aus den Versuchsdaten zweier Versuchspersonen zusammen mit der Konfiguration des Raumes gezeigt. Hierzu werden die Objekte gemäß dem Farbkode aus Tabelle 5.1(b) gezeichnet.

Die Rohdaten zweier verschiedener Versuchspersonen zeigt Abb. 5.3. Dabei wird das Dreieck BCD betrachtet. Objekt B (rosa) ist das Startobjekt, Objekt C (grün) das Wegobjekt und Objekt D (hellblau) das Endobjekt. Die schwarze Linie beschreibt die von der Versuchsperson zurückgelegte Trajektorie. Sie sollte vom Endpunkt (Objekt D) wieder zurück zum Startpunkt (Objekt B) führen.

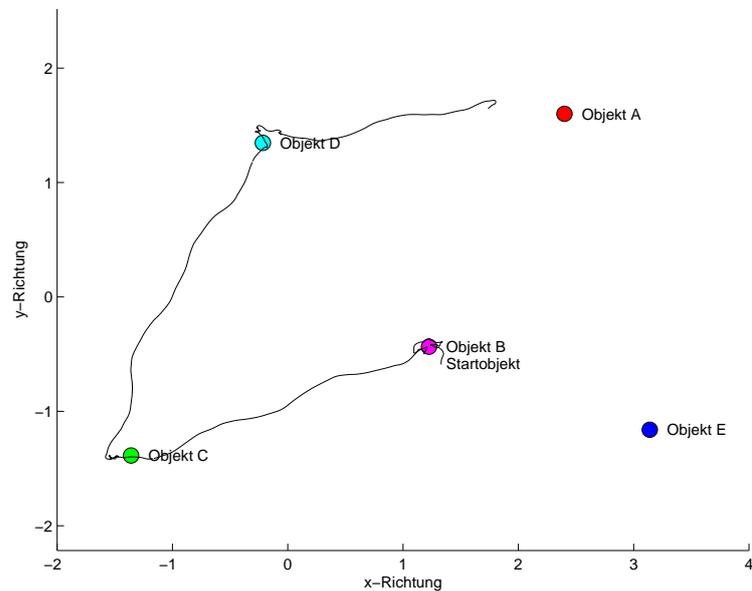
Bei beiden Versuchspersonen lässt sich eine Art „welliger Gang“ erkennen. Ursachen dieser Schlangenlinien sind Gewichtsverlagerungen beim Laufen, da das Überwachungssystem immer die Position des Kopfes berechnet. Jede nach rechts ausgeprägte Wellenlinie ist ein Schritt auf das rechte Bein und umgekehrt. In Abb. 5.3(b) wird Objekt C (grün) sogar nicht ganz erreicht. Befindet sich eine Versuchsperson im Umkreis von 20 cm um den Mittelpunkt eines Objektes, gilt das Objekt als erreicht.

In beiden Abbildungen sind beim Startobjekt B (rosa) zackige, aber auch kreisförmige Linien zu sehen. Diese entstehen, wenn die Versuchsperson nicht zielstrebig losgeht, sondern sich am Startpunkt umsieht, um sich die Umgebung besser einzuprägen.

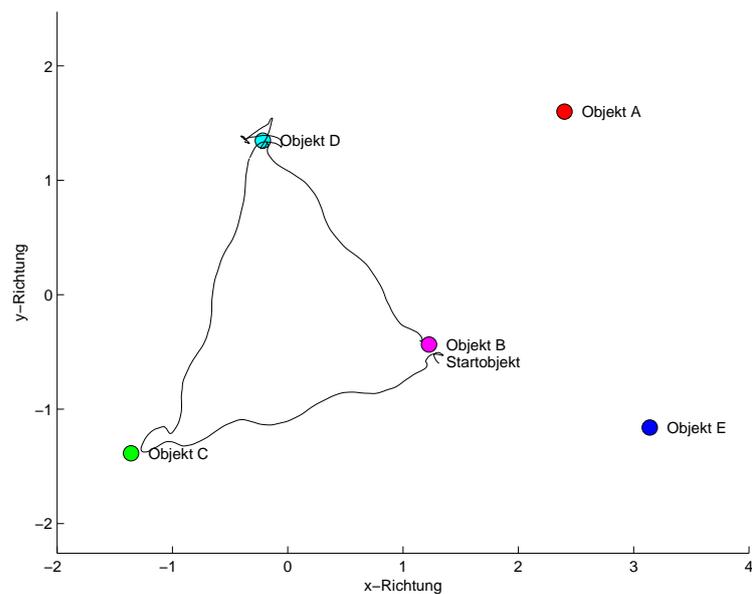
Beim Wegobjekt C (grün) sind bei Versuchsperson 11 auch einige zackige Linien zu erkennen, für die es zwei Erklärungen gibt: Entweder hat der Versuchsteilnehmer hier seinen Kopf gedreht und sich umgesehen, wo er als nächstes hingehen muss, oder er hat sich noch einmal die Konfiguration der Objekte angeschaut.

Am Zielobjekt D (hellblau) sind ebenfalls Ausschläge in den Linien zu erkennen. Diese sind auf die verschiedenen Bewegungen bei den Zeigemethoden, welche die Versuchsperson bewältigen muss, zurückzuführen. Bei der Zeigemethode Spiegel muss die Versuchsperson das Startobjekt B im Rückspiegel einstellen. Bei der Zeigemethode Schauen dreht sich die Versuchsperson im Idealfall genau um 180° . Um die Zeigemethoden zu bewältigen, müssen die Versuchspersonen ihren Kopf und ihren Körper drehen.

Die Strecke vom Ziel- zum Startpunkt (Objekt D zu Objekt B) ist der Versuchsperson unbekannt, kann aber durch die Wegintegration (siehe Abschnitt 2.1) bestimmt werden. Dabei führen die verschiedenen Versuchsdurchläufe zu jeweils unterschiedlichen Resultaten. In Abb. 5.3(a) läuft Versuchsperson 11 in die falsche Richtung. Anstatt in Richtung von Objekt A (rot) zu laufen, hätte sie in Richtung von Objekt B (rosa) laufen müssen. Die Länge der Strecke wurde dabei trotzdem gut reproduziert. In Abb. 5.3(b) kann Versuchsperson 12 die Länge der Strecke und die Richtung sehr gut reproduzieren.



(a) Versuchsperson 11 in Runde 4 - Dreieck BCD



(b) Versuchsperson 12 in Runde 2 - Dreieck BCD

Abbildung 5.3: Das Startobjekt entspricht Objekt B (rosa), das Wegobjekt Objekt C (grün) und das Endobjekt Objekt D (hellblau). Die schwarze Linie beschreibt die Wege zwischen diesen Objekten. Die Trajektorie der Versuchsperson sollte von Objekt B über Objekt C zu Objekt D und wieder zurück zu Objekt B führen. Alle Objekte sind farbkodiert (siehe Abb. 5.1).

Die Unterschiede dieser beiden Versuchspersonen zeigen sich auch in Abb. 5.4. Hierbei wurden alle Positionsfehler mit den zugehörigen Fehlerellipsen gezeichnet. Man kann deutlich sehen, dass Versuchsperson 11 (siehe Abb. 5.4(a)) am Besten die Position von Objekt E (blau) reproduzieren konnte. Besonders für die Objekte A (rot), C (grün) und D (hellblau) zeigt sich eine große Streuung der Positionsfehler. Objekt A (rot) und Objekt C (grün) weisen aber nicht nur eine große Streuung auf, sondern werden zudem in einer anderen Richtung vermutet. Die unterschätzte Strecke zwischen diesen Objekten ist dabei im Mittel 2,5 m. Besonders Objekt B (rosa) demonstriert eine interessante Auffälligkeit: Die Versuchsperson reproduziert immer eine ähnliche Stelle. Sie ist sich somit sicher, wo sich Objekt B befindet. Trotzdem befindet sie sich näher an Objekt A als an Objekt B. Die Länge der Strecke wurde dabei im Mittel um 0,46 m unterschätzt.

Ein ganz anderes Verhalten zeigt Versuchsperson 12 (siehe Abb. 5.4(b)). Diese Versuchsperson zeigt nicht so große Streuungen wie Versuchsperson 11 und kann die Objektposition auch genauer anzeigen. Die Distanz von Objekt C (grün) zu Objekt A (rot) wird dabei im Mittel um 0,9 m unterschätzt, die Länge der Strecke von Objekt A (rot) zu Objekt D (hellblau) im Mittel um 0,6 m überschätzt.

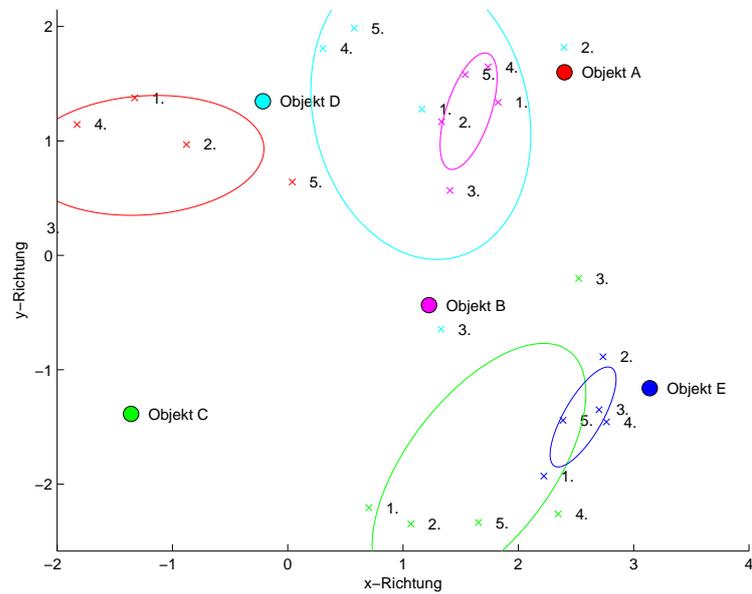
Diese beiden Versuchspersonen zeigen zwei unterschiedliche Leistungen. Während Versuchsperson 11 eine schlechte Leistung erzielt, machte Versuchsperson 12 viel weniger, bzw. kleinere Fehler.

5.3 Richtungsfehler

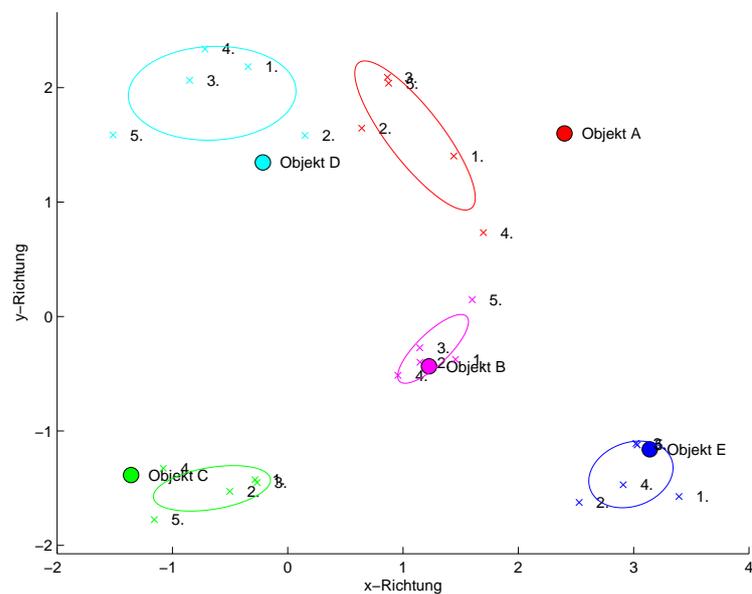
In der virtuellen Realität müssen die Versuchspersonen die iterierte Dreiecksvervollständigung bewältigen. Dazu laufen sie vom Startpunkt über einen Wegpunkt zum Endpunkt. Am Endpunkt folgen die Zeigemethoden, die den Heimvektor, den die Versuchspersonen durch Wegintegration aufgebaut haben, reproduzieren. Bei den Zeigemethoden Spiegel und Schauen kann ein Richtungsfehler auftreten. Zeigt die Versuchsperson links am Objekt vorbei, so hat der Richtungsfehler ein negatives Vorzeichen. Zeigt sie rechts am Objekt vorbei, so ist das Vorzeichen positiv.

Der durchschnittliche Richtungsfehler der Zeigemethode Spiegel ist $f = 1,9^\circ$ mit einer Varianz von $s = 13,6^\circ$. Der Richtungsfehler ist also sehr klein, doch gilt es zu beachten, dass er sich aus positiven und negativen Werten zusammensetzt. Abb. 5.5 zeigt den durchschnittlichen Richtungsfehler aller Runden. Hier wurde über die Versuchspersonen gemittelt. Der schwarze Pfeil gibt in beiden Abbildungen die exakte Richtung vom jeweiligen Zielobjekt auf das Startobjekt an, also die Sollrichtung.

Der Mittelwert über alle Versuchspersonen und Runden beträgt bei Objekt A $f_{\text{Obj A}} = 15^\circ$. Die Versuchspersonen haben also immer rechts am Objekt vorbei gezeigt. Dies bestätigen auch Abb. 5.7(a) und 5.5 (rot). Nur eine Versuchsperson hat links an Objekt A vorbei gezeigt. Die Versuchspersonen haben auch rechts an Objekt B und C vorbei gezeigt, allerdings gab es in diesen Fällen mehr Versuchspersonen, die auch links vorbei zeigten. Der Mittelwert des Richtungsfehlers an Objekt B ist mit $f_{\text{Obj B}} = 6^\circ$ kleiner, bleibt aber positiv. An Objekt D ($f_{\text{Obj D}} = -16,6^\circ$) und E ($f_{\text{Obj E}} = -6,8^\circ$) wurde immer links vorbei gezeigt, daher hat der Richtungsfehler ein negatives Vorzeichen.



(a) Positionsfehler von Versuchsperson 11



(b) Positionsfehler von Versuchsperson 12

Abbildung 5.4: Positionsfehler zweier Versuchspersonen mit Fehlerellipse. Die Farbkodierung der Objekte und der zugehörigen Fehlerellipsen entspricht Abb. 5.1.

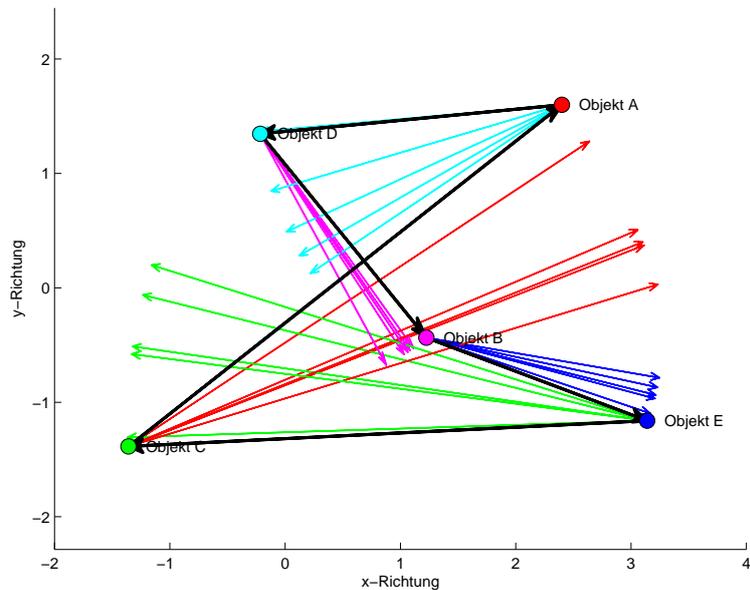


Abbildung 5.5: Richtungsfehler der Zeigemethode Spiegel mit Mittelwert je Runde über alle Versuchspersonen. Der schwarze Pfeil gibt die Sollrichtung der jeweiligen Dreiecksvervollständigung an. Die Objekte und die dazugehörigen Pfeile sind gemäß Abb. 5.1 farbmarkiert.

chen. Am kleinsten ist der Richtungsfehler am innenliegenden Objekt B ($f_{\text{Obj B}} = 6^\circ$), am größten bei Objekt A ($f_{\text{Obj A}} = 15^\circ$) und D ($f_{\text{Obj D}} = -16,6^\circ$). Tabelle 5.1(a) fasst die Mittelwerte und die dazugehörige Varianz zusammen.

Bei der Zeigemethode Schauen beträgt der durchschnittliche Richtungsfehler $f = 0,2^\circ$ mit einer Varianz von $s = 24,4^\circ$. Abb. 5.6 zeigt den durchschnittlichen Richtungsfehler innerhalb einer jeden Runde. Hier wurde über die Versuchspersonen gemittelt. Der schwarze Pfeil gibt erneut die Sollrichtung an.

Bei Objekt A hat sich das Vorzeichen des Richtungsfehlers geändert. Bei der Zeigemethode Spiegel war der Mittelwert $f_{\text{Obj A Spiegel}} = 15^\circ$, bei der Zeigemethode Schauen ist er $f_{\text{Obj A Schauen}} = -10,2^\circ$ (vergleiche Abb. 5.6 und 5.5 (rot)). Die Mittelwerte von Objekt B ($f_{\text{Obj B}} = 6,7^\circ$) und Objekt C ($f_{\text{Obj C}} = 11,9^\circ$) der Zeigemethode Schauen sind vergleichbar mit der Zeigemethode Spiegel. Der Mittelwert von Objekt D ($f_{\text{Obj D}} = -5,8^\circ$) ist bei der Zeigemethode Schauen sehr viel kleiner als bei der Zeigemethode Spiegel. Der kleinste Richtungsfehler trat wieder bei Objekt E ($f_{\text{Obj E}} = -3,4^\circ$) auf.

Der mittlere Richtungsfehler der Zeigemethoden hat sich also von links ($f_{\text{Spiegel}} = -1,9^\circ$) am Objekt vorbei auf etwas rechts ($f_{\text{Schaun}} = 0,2^\circ$) am Objekt vorbei verschoben. Interessant ist der Vorzeichenwechsel des Richtungsfehlers bei Objekt A. Bei der Zeigemethode Spiegel zeigen die Versuchspersonen eher rechts an Objekt A vorbei, während sie bei der Zeigemethode Schauen links vorbei zeigen. Es stellt sich heraus, dass bei Objekt D und der Zeigemethode Spiegel der größte Richtungsfehler zu finden ist, während er am selben Objekt bei der Zeigemethode Schauen viel kleiner ist. Diese Ergebnisse werden durch eine dreifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA)

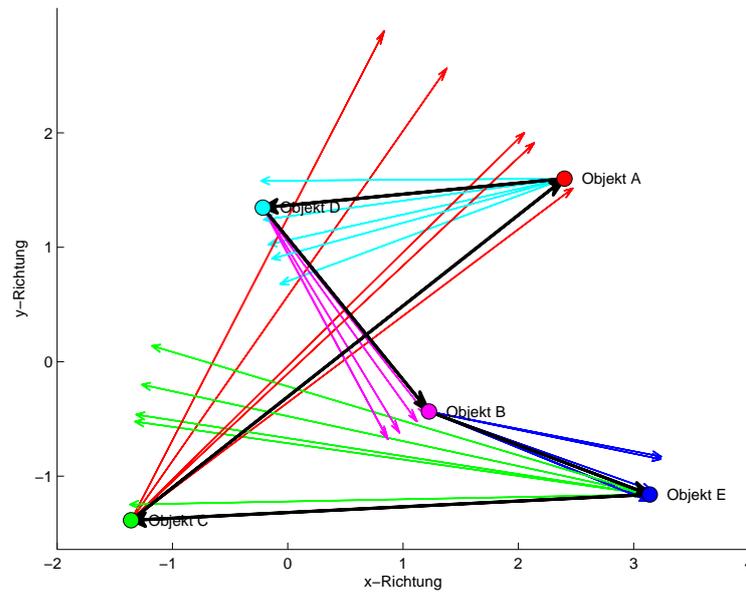


Abbildung 5.6: Richtungsfehler der Zeigemethode Schauen mit Mittelwert je Runde über die Versuchspersonen. Der schwarze Pfeil gibt die Sollrichtung der jeweiligen Dreiecksvervollständigung an. Die Objekte und die dazugehörigen Pfeile sind gemäß Abb. 5.1 farbmarkiert.

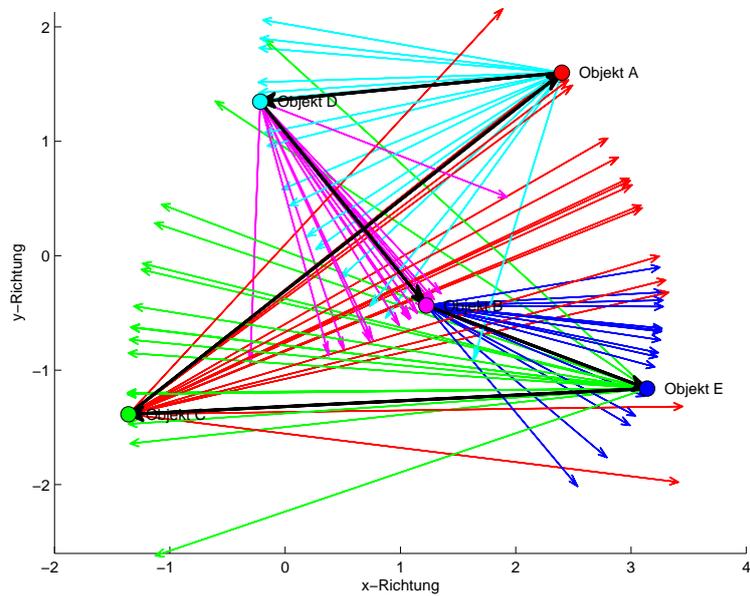
bekräftigt. Dazu werden die Zeigemethode, die Objekte und die Runden betrachtet. Die Zeigemethode hat mit $p = 0,43$ keinen Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen, wie auch die Runden ($p = 0,96$), die Wechselwirkung zwischen Methode und Runden ($p = 0,95$) und die Wechselwirkung zwischen Runden und Objekt ($p = 0,66$). Nur die Objekte und die Wechselwirkung Methode und Objekte sind signifikant ($p \ll 0,01$).

Tabelle 5.1 fasst die Mittelwerte und Varianzen der beiden Zeigemethoden zusammen. Links sind die Werte der Zeigemethode Spiegel zu sehen, rechts die der Zeigemethode Schauen.

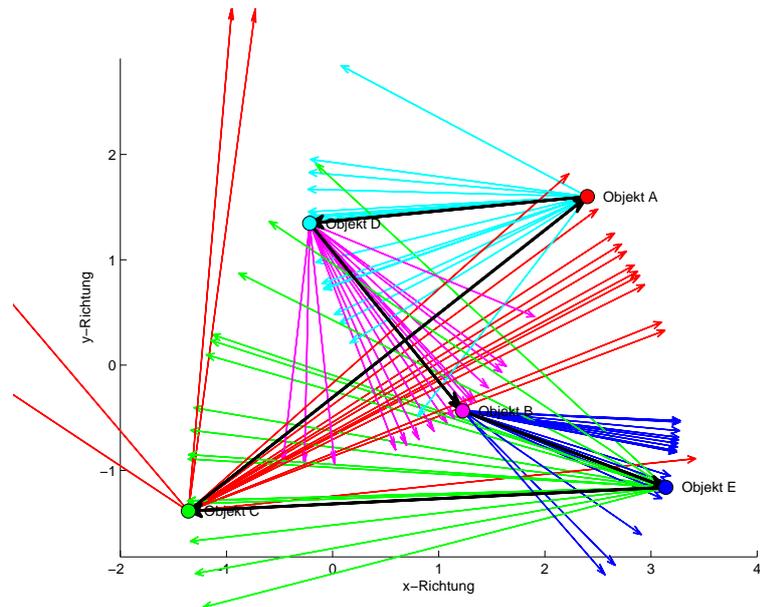
| Methode | Objekt | Mittelwert | Varianz | Methode | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|---------|--------|------------|---------|---------|--------|------------|---------|
| Spiegel | A | 15,00 | 6,16 | Schauen | A | -10,21 | 10,25 |
| Spiegel | B | 6,00 | 18,37 | Schauen | B | 6,73 | 4,48 |
| Spiegel | C | 12,00 | 7,42 | Schauen | C | 11,86 | 5,57 |
| Spiegel | D | -16,61 | 11,54 | Schauen | D | -5,82 | 13,42 |
| Spiegel | E | -6,75 | 3,35 | Schauen | E | -3,39 | 7,55 |

Tabelle 5.1: Mittelwert und Varianz des Richtungsfehlers über alle Versuchspersonen. Links die Werte der Zeigemethode Spiegel, rechts die der Zeigemethode Schauen.

Abb. 5.7 zeigt die Richtungsfehler der einzelnen Versuchspersonen der Zeigemethoden Spiegel und Schauen. Die Unterschiede zwischen den Versuchspersonen zeigen



(a) Richtungsfehler der Zeigemethode Spiegel: Mittelwert je Versuchsperson über alle Runden



(b) Richtungsfehler der Zeigemethode Schauen: Mittelwert je Versuchsperson über alle Runden

Abbildung 5.7: Richtungsfehler der Zeigemethode Spiegel und Schauen der Versuchspersonen. Der schwarze Pfeil gibt die Sollrichtung der jeweiligen Dreiecksvervollständigung an. Die Objekte und die dazugehörigen Pfeile sind gemäß Abb. 5.1 farbmarkiert.

sich besonders gut an Objekt A (rot). Bei der Zeigemethode Spiegel zeigt nur eine Versuchsperson links vorbei. Bei der Zeigemethode Schauen zeigen fünf Versuchspersonen links vorbei. Allerdings ist dort der Richtungsfehler so groß, dass sich das Vorzeichen des Mittelwertes ändert. Bei keinem anderen Objekt tritt eine so große Verschiebung des Mittelwertes auf. Beide Abbildungen zeigen deutlich, wie unterschiedlich die Leistungen der Versuchspersonen sind. Viele zeigen sehr gut auf ein bestimmtes Objekt, wie z.B. auf Objekt B (rosa) in Abb. 5.7(a). Bei Objekt E (blau) in Abb. 5.7(b) zeigen zwar viele Versuchspersonen auf den gleichen Punkt aber trotzdem am eigentlichen Objekt vorbei.

5.4 Auswertungen der verschiedenen Zeigemethoden

Bei der iterierten Dreiecksvervollständigung geht die Versuchsperson zwei Schenkel eines Dreieckes ab. Sie läuft vom Startpunkt über den Wegpunkt zum Endpunkt. Am Endpunkt folgt die Zeigeaufgabe, die sich hier in die drei Zeigemethoden, Spiegel, Schauen und Laufen, aufteilt. Zur Auswertung wird die Position der Versuchsperson in x/y - Koordinaten sowie die Blickrichtung in Grad benötigt.

Bei der Auswertung der Zeigemethoden Spiegel und Schauen wird im Folgenden der absolute Fehler der Blickrichtung in Grad ausgewertet. Dieser Wert setzt sich aus dem Betrag der Richtungsfehler (Abschnitt 5.3) zusammen und ist somit vorzeichenlos.

Bei der Zeigemethode Laufen wird die x/y - Position der Versuchsperson benutzt. Aus dieser Position lassen sich der Distanzfehler (siehe Abb. 5.2(b)) sowie der Streckenfehler (siehe Abb. 5.2(c)) berechnen. Der Distanzfehler ist dabei der Abstand zwischen Objektposition und Position der Versuchsperson, der Streckenfehler bezeichnet die Differenz der Länge der Strecke, welche die Versuchsperson zurückgelegt hat, und der korrekten Distanz zum Startpunkt.

5.4.1 Auswertung der Zeigemethode Spiegel

Der mittlere Fehler der Zeigemethode Spiegel beträgt $f = 19,3^\circ$ mit einer Varianz von $s = 5^\circ$. Der größte Fehler ($f_{\text{Obj D}} = 25,28^\circ$) trat beim Zeigen auf Objekt D auf, der kleinste ($f_{\text{Obj B}} = 14,51^\circ$) beim Zeigen auf Objekt B. Diese beiden Extreme haben sich auch schon beim Richtungsfehler in Abschnitt 5.3 gezeigt. Die größten Standardabweichungen ($s > 5,3^\circ$) weisen die Objekte C und D auf. Die kleinste Standardabweichung ($s = 2,26^\circ$) findet sich bei Objekt B. Der Mittelwert über die Runden unterliegt nicht so großen Schwankungen. Der größte Fehler ($f_{\text{Runde 3}} = 22,08^\circ$) wurde in Runde 3 gemacht, der kleinste ($f_{\text{Runde 5}} = 17,55^\circ$) in Runde 5. Die Standardabweichung über die Runden unterliegt nicht so großen Schwankungen, sie liegt zwischen $4,19^\circ < s < 5,57^\circ$. Tabelle 5.2 zeigt Mittelwert und Varianz über die Objekte und über die Runden.

Abb. 5.8 zeigt den mittleren Fehler pro Objekt in den verschiedenen Runden. Diese Abbildung wurde entsprechend Abb. 5.1 farbkodiert. Die Winkel in den gezeichneten Karten der Versuchspersonen wurden gemittelt und ebenfalls mit der gleichen Farbkodierung in die Abbildung eingetragen. In der Abbildung ist keine Lernkurve zu erkennen ($p = 0,52$). Obwohl bei Objekt A der zweitgrößte Zeigefehler gemacht wurde,

5.4 Auswertungen der verschiedenen Zeigemethoden

| Methode | Durchgang | Mittelwert | Varianz | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|---------|-----------|------------|---------|--------|------------|---------|
| Spiegel | 1 | 18,65° | 4,19° | A | 19,87° | 3,60° |
| Spiegel | 2 | 19,98° | 4,91° | B | 14,51° | 2,26° |
| Spiegel | 3 | 22,08° | 5,53° | C | 19,23° | 5,32° |
| Spiegel | 4 | 18,04° | 5,22° | D | 25,28° | 4,23° |
| Spiegel | 5 | 17,55° | 5,57° | E | 17,39° | 5,57° |

Tabelle 5.2: Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Spiegel.

haben die Versuchspersonen Objekt A in der Karte mit einem mittleren Fehler von $f_{\text{Karte Obj A}} = 9,49^\circ$ am Besten gezeichnet. Im Gegensatz dazu wurde das innenliegende Objekt B in der Karte mit dem größten Fehler von $f_{\text{Karte Obj B}} = 20,29^\circ$ gezeichnet, beim Zeigeversuch konnte auf dieses Objekt am Besten ($f_{\text{Obj B}} = 14,51^\circ$) gezeigt werden. In einem t-Test wurden die gezeigten Winkel mit den gezeichneten Winkel aus den Karten verglichen. Die Nullhypothese, dass Werte gleich sind, konnte mit $0,29 < p < 0,93$ nicht zurückgewiesen werden.

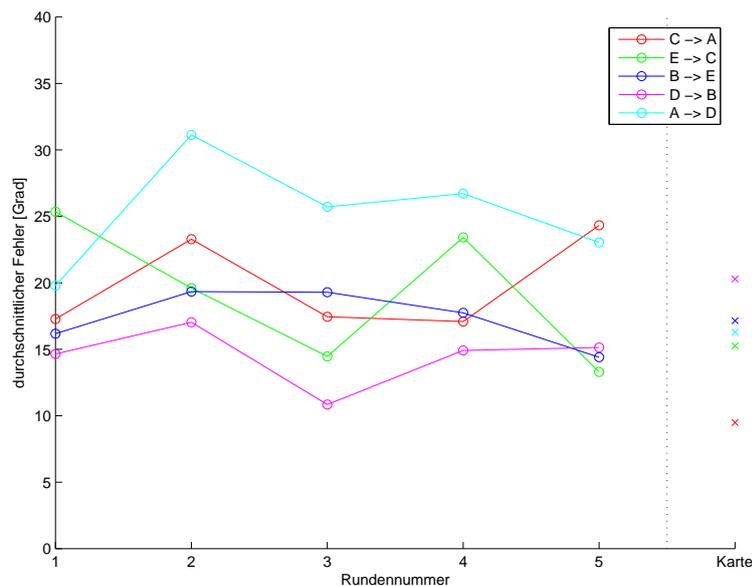


Abbildung 5.8: Absoluter Fehler der Zeigemethode Spiegel und die Fehler aus den gezeichneten Karten. Die Farbkodierung der Objekte entspricht Abb. 5.1.

In einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) wurde untersucht, ob die Objekte oder Runden einen Einfluss auf den Fehler haben. Außerdem wurde getestet, ob es Wechselwirkungen zwischen den Objekten und den Runden gibt. Dabei würde es z.B. in einer Runde bei einem Objekt Probleme geben, die sich auf den Fehler der Versuchsperson auswirken. Weder die Runden ($p = 0,52$) haben Einfluss auf die Fehler der Versuchsperson, noch gibt es eine Wechselwirkung zwischen den Objekten und den Runden ($p = 0,85$). Allerdings haben die Objekte mit $p \ll 0,01$ Einfluss

auf die Leistung der Versuchspersonen. Objekt D ist dabei signifikant von Objekt B und E verschieden. Schon früh ist der Unterschied zwischen Objekt B und Objekt D aufgefallen. Die Beobachtungen, die beim Richtungsfehler in Abschnitt 5.3 gemacht wurden, sowie die Mittelwerte der absoluten Fehler, werden daher durch die ANOVA bekräftigt.

Da an keinem der fünf Objekte eine Lernkurve auftritt finden sich keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis durch die iterierte Dreiecksvervollständigung mit der Zeigemethode Spiegel.

5.4.2 Auswertung der Zeigemethode Schauen

Der mittlere Fehler der Zeigemethode Schauen beträgt $f = 19,44^\circ$ mit einer Varianz von $s = 3,6^\circ$. Die absoluten Fehler der beiden Zeigemethoden Spiegel und Schauen unterscheiden sich kaum. Der größte Fehler ($f_{\text{Obj A}} = 21,16^\circ$) trat beim Zeigen auf Objekt A auf, der kleinste ($f_{\text{Obj E}} = 15,7^\circ$) beim Zeigen auf Objekt E. Diese beiden Extreme haben sich so ähnlich auch schon beim Richtungsfehler in Abschnitt 5.3 abgezeichnet. Die Fehler von Objekt B, C und D liegen sehr nahe beieinander, $20,0^\circ < f_{\text{Obj B, C, D}} < 20,3^\circ$. Die Fehler unterliegen nicht so großen Schwankungen wie in der Zeigemethode Spiegel. Die größten Standardabweichungen ($s_{\text{Obj B}} = 4,92^\circ$) weist Objekt B auf. Die kleinste Standardabweichung ($s_{\text{Obj E}} = 1,78^\circ$) findet sich bei Objekt E. Der Mittelwert über die Runden unterliegt keinen großen Schwankungen. Der größte Fehler ($f_{\text{Runde 3}} = 21,27^\circ$) wurde in Runde 3 gemacht, der kleinste ($f_{\text{Runde 5}} = 17,48^\circ$) in Runde 5. Die Standardabweichung über die Runden unterliegt etwas größeren Schwankungen, sie liegt zwischen $2,44^\circ < s < 5,2^\circ$. Tabelle 5.3 zeigt Mittelwert und Varianz über die Objekte und über die Runden.

| Methode | Durchgang | Mittelwert | Varianz | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|---------|-----------|------------|---------|--------|------------|---------|
| Schauen | 1 | 19,64° | 3,98° | A | 21,16° | 2,53° |
| Schauen | 2 | 18,80° | 2,66° | B | 20,00° | 4,92° |
| Schauen | 3 | 21,27° | 5,20° | C | 20,31° | 3,16° |
| Schauen | 4 | 20,02° | 2,44° | D | 20,05° | 3,64° |
| Schauen | 5 | 17,48° | 3,76° | E | 15,70° | 1,78° |

Tabelle 5.3: Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Schauen.

Abb. 5.9 zeigt den mittleren Fehler pro Objekt in den verschiedenen Runden. Diese Abbildung wurde entsprechend Abb. 5.1 farbkodiert. Die Winkel in den gezeichneten Karten der Versuchspersonen wurden gemittelt und ebenfalls mit der gleichen Farbkodierung in die Abbildung eingetragen. In der Abbildung ist keine Lernkurve zu erkennen ($p = 0,79$). Auf das innenliegende Objekt B konnte in der letzten Runde am schlechtesten gezeigt werden, dies ist auch im Fehler der Karte zu finden. Die Fehler in der Karte bestätigen die Fehler der letzten Runde, wie auch die mittleren Fehler. In

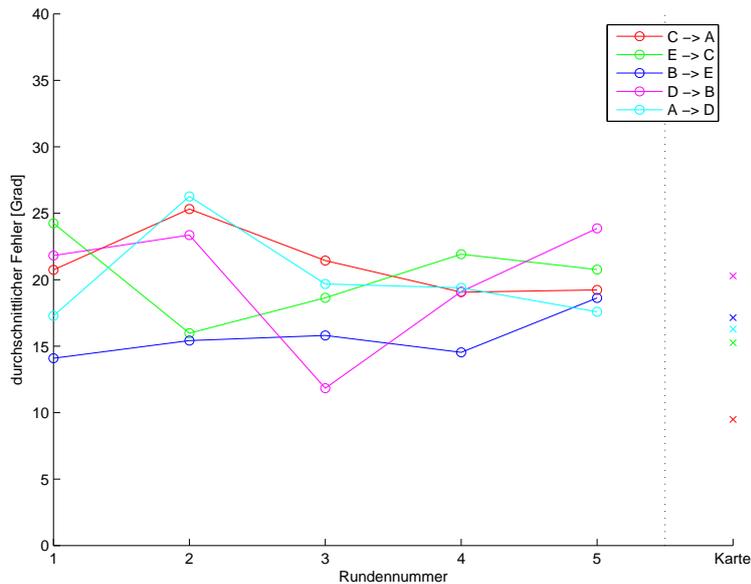


Abbildung 5.9: Absoluter Fehler der Zeigemethode Schauen. Die Farbkodierung der Objekte entspricht Abb. 5.1.

einem t-Test wurden die gezeigten Winkel mit den gezeichneten aus den Karten verglichen. Die Nullhypothese, dass Werte gleich sind, konnte mit $0,40 < p < 0,93$ nicht zurückgewiesen werden.

Auch hier wurde in einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) der Einfluss von Runden, Objekten sowie Wechselwirkungen auf die die Leistung der Versuchsperson untersucht. Die Runden haben keinen Einfluss auf die Fehler der Versuchsperson ($p = 0,79$), es gibt also keine Lernkurve. Auch die Objekte zeigen keinen Einfluss ($p = 0,43$), d.h. die Winkel, welche die Versuchsperson reproduzieren mussten, hatten keine Auswirkungen. Es ist also für die Versuchspersonen nicht wichtig, ob der zu reproduzierende Winkel klein oder groß ist. Wechselwirkungen konnten mit $p = 0,95$ ausgeschlossen werden, d.h. in keiner Runde hatte ein bestimmtes Objekt einen Effekt auf die Zeigeleistung der Versuchspersonen. Die kleinen Schwankungen des Richtungsfehlers der Zeigemethode Spiegel, sowie die kaum vorhandenen Schwankungen der Mittelwerte, werden daher durch die ANOVA bekräftigt.

Wieder wird die Theorie nicht bestätigt, dass, durch die iterierte Dreiecksvervollständigung mit der Zeigemethode Schauen, metrische Informationen in das räumliche Langzeitgedächtnis integriert werden. Diese Aussage wird durch eine weitere einseitige ANOVA bekräftigt. Die Zeigemethode, Spiegel oder Schauen, hat mit $p = 0,89$ keinen Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen. Die Leistungsrückmeldung im Spiegel wurde nicht genutzt, da sich die Leistung der Zeigemethode Schauen nicht signifikant verändert.

5.4.3 Auswertung der Zeigemethode Laufen

Nachdem die Versuchsperson bei der iterierten Dreiecksvervollständigung zwei Schenkel eines Dreieckes abgelaufen ist und die Zeigemethoden Spiegel und Schauen bewältigt hat, folgt die Zeigemethode Laufen. Dabei läuft sie vom Endpunkt zum Startpunkt zurück. Da sie nach der Zeigemethode Schauen das Startobjekt anschaut, können keine unterschiedlichen Winkel ausgewertet werden. Der Winkel mit dem die Versuchsperson losläuft entspricht dem Winkel mit dem sie ankommt.

Bei der Zeigemethode Laufen werden die Positionsfehler, bestehend aus der x/y - Position, der Versuchsperson benutzt. Aus dieser Position lassen sich der Distanzfehler (siehe Abb. 5.2(b)), also der Abstand zwischen der Objektposition und der Position der Versuchsperson, sowie der Streckenfehler (siehe Abb. 5.2(c)), die Länge der Strecke, welche die Versuchsperson zurückgelegt hat, berechnen.

Abb. 5.10 zeigt die mittleren Positionsfehler der Versuchspersonen je Runde. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass nicht nur die Distanz zu Objekt A falsch reproduziert wurde, sondern dass auch die Richtung, in der Objekt A vermutet wurde, falsch ist. Objekt C liegt auch weit außerhalb der Fehlerellipse. Objekt D ist näher als die anderen Objekte an der Fehlerellipse.

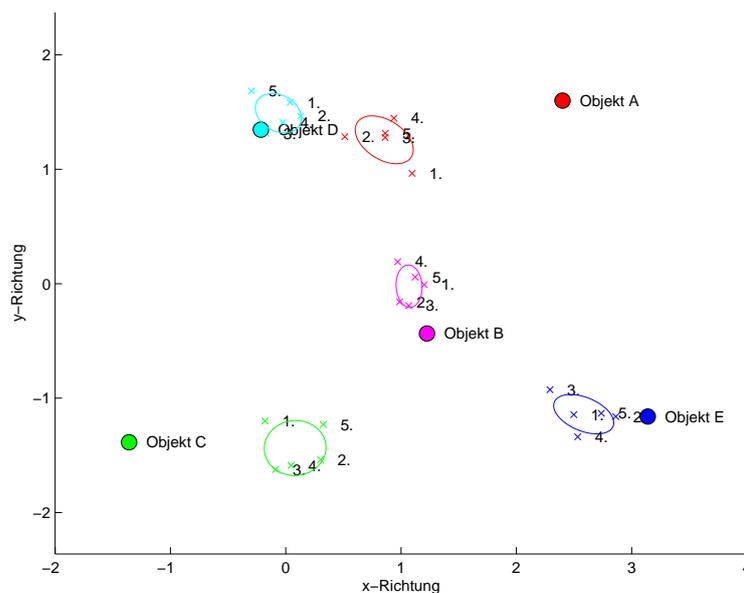


Abbildung 5.10: Positionsdaten mit Fehlerellipsen der Zeigemethode Laufen. Die Farbkodierung der Objekte sowie der Fehlerellipsen entspricht Abb. 5.1.

Auswertung des Distanzfehlers

Der mittlere Fehler der Zeigemethode Laufen bei der Auswertung des Distanzfehlers beträgt $f = 1,26$ m mit einer Varianz von $s = 0,46$ m. Der größte mittlere Abstand findet sich in der zweiten Runde ($f_{\text{Runde } 2} = 1,34$ m). Zu Objekt A und C ist ein großer Abstand der Versuchspersonen mit $f_{\text{Obj } A, C} > 1,6$ m zu finden. Dies veranschaulicht auch Abb. 5.10. Die beiden längsten Strecken wurden nicht so gut reprodu-

ziert. Die Versuchspersonen haben zu den anderen Objekten einen mittleren Abstand von $0,89 \text{ m} < f_{\text{Obj B, D, E}} < 0,98 \text{ m}$. Tabelle 5.4 zeigt Mittelwert und Varianz über die Objekte und über die Runden.

Abb. 5.11 zeigt die mittleren Abstände pro Objekt in den verschiedenen Runden. Diese Abbildung wurde entsprechend Abb. 5.1 farbkodiert. In der Abbildung ist keine Lernkurve zu erkennen ($p = 0,86$). Der Distanzfehler ist bei den Objekten A und C am größten. Hier waren die längsten Strecken zu laufen. Man kann deutlich den Unterschied zwischen den Objekten A und C und den Objekten B, D und E erkennen.

| Methode | Durchgang | Mittelwert | Varianz | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|---------------|-----------|------------|---------|--------|------------|---------|
| Distanzfehler | 1 | 1,26m | 0,3m | A | 1,82m | 0,16m |
| Distanzfehler | 2 | 1,34m | 0,7m | B | 0,93m | 0,15m |
| Distanzfehler | 3 | 1,21m | 0,3m | C | 1,67m | 0,20m |
| Distanzfehler | 4 | 1,20m | 0,5m | D | 0,98m | 0,06m |
| Distanzfehler | 5 | 1,29m | 0,3m | E | 0,89m | 0,15m |

Tabelle 5.4: Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Laufen – Auswertung des Distanzfehlers.

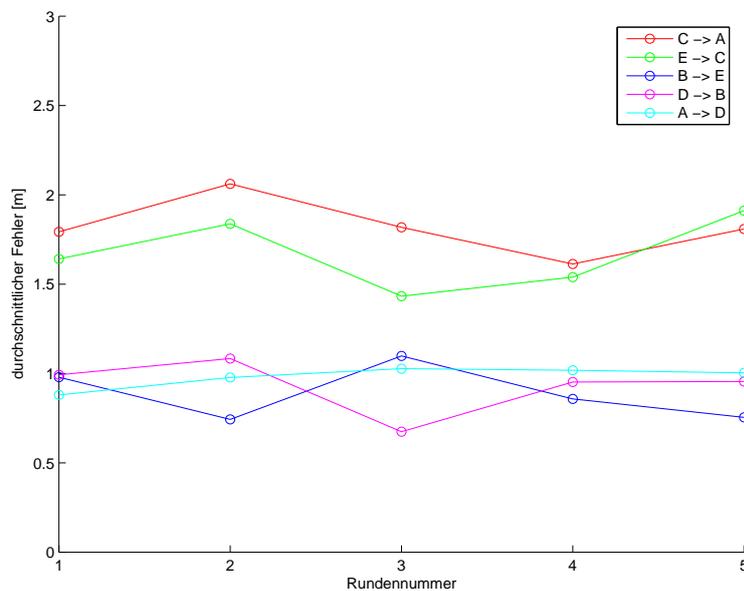


Abbildung 5.11: Distanzfehler der Zeigemethode Laufen aller Versuchspersonen. Die Farbkodierung der Objekte entspricht Abb. 5.1.

Wieder wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) benutzt. Dabei zeigt sich, dass weder die Runden ($p = 0,86$) einen Einfluss auf die Fehler der Versuchsperson haben, noch eine Wechselwirkung ($p = 0,96$) zwischen den Objekten und den Runden besteht. Allerdings haben die Objekte mit $p \ll 0,01$ Einfluss auf den Abstand zwischen der Position der Versuchsperson und dem Objekt. Die Objekte A und C

sind dabei signifikant von den Objekten B, D und E verschieden. Der Distanzfehler der Versuchspersonen ist also abhängig von der Länge der Strecke, welche die Versuchspersonen zurücklegen müssen. Auch Abb. 5.11 lässt dieses Ergebnis erahnen. Die Aussagekraft dieser Abbildung wird durch die ANOVA bekräftigt.

Auch die Auswertung des Abstandes der Zeigemethode Laufen gibt keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis.

Auswertung des Streckenfehlers

Der Streckenfehler gibt die zurückgelegte Strecke der Versuchsperson an. Abb. 5.12 zeigt die Konfiguration der Objekte zusammen mit den Entfernungen vom jeweiligen Zielobjekt zum Startobjekt. Die Farbkodierung der Objekte sowie der Entfernungen entspricht Abb. 5.1. Zur Auswertung wird die Differenz zwischen dem Streckenfehler der Versuchsperson und der Entfernung vom jeweiligen Ziel- zum Startpunkt gebildet. Hat die Differenz ein negatives Vorzeichen, wurde die Strecke zwischen Ziel- und Startpunkt unterschätzt, die Versuchsperson ist nicht weit genug gelaufen. Bei einer Differenz mit positivem Vorzeichen wurde die Strecke überschätzt, die Versuchsperson ist zu weit gelaufen.

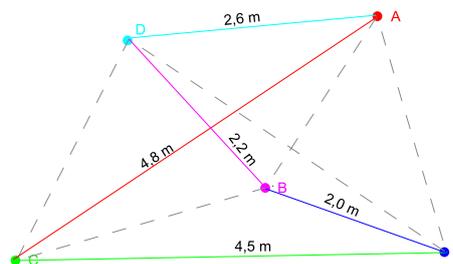


Abbildung 5.12: Länge der Strecken zwischen Endpunkt und Startpunkt, farbkodiert gemäß Abb. 5.1.

Die mittlere Differenz der Zeigemethode Laufen bei der Auswertung des Streckenfehlers beträgt $f = -0,6$ m mit einer Varianz von $s = 0,6$ m. Die Strecke wurde also unterschätzt. Die größte mittlere Differenz findet sich in der dritten Runde ($f_{\text{Runde 3}} = -0,65$ m). Bis auf die Strecke zu Objekt D wurden alle Strecken unterschätzt. Die Streckenfehler der Versuchspersonen sind zu kurz. Die größte Differenz ($f_{\text{Obj A, C}} = -1,2$ m) tritt bei den längsten Strecken, zu den Objekten A und C, auf. Die unterschätzte Differenz ist bei den anderen Objekten $-0,19 \text{ m} < -f_{\text{Obj B, D, E}} < 0,01$ m. Dies war auch schon bei der Auswertung des Abstandes zwischen der Position der Versuchsperson und dem Objekt zu beobachten.

Tabelle 5.5 zeigt Mittelwert und Varianz über die Objekte und über die Runden.

Abb. 5.13 zeigt die mittlere Differenz zwischen der von der Versuchsperson zurückgelegten Strecke und der jeweiligen Strecke vom Ziel- zum Startpunkt pro Objekt in den verschiedenen Runden. Diese Abbildung wurde entsprechend Abb. 5.1 farbkodiert. In der Abbildung ist keine Lernkurve zu erkennen ($p = 0,94$). Die Differenz ist bei den

5.4 Auswertungen der verschiedenen Zeigemethoden

| Methode | Durchgang | Mittelwert | Varianz | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|----------------|-----------|------------|---------|--------|------------|---------|
| Streckenfehler | 1 | -0,55m | 0,48m | A | -1,15m | 0,13m |
| Streckenfehler | 2 | -0,63m | 0,55m | B | -0,21m | 0,19m |
| Streckenfehler | 3 | -0,65m | 0,71m | C | -1,19m | 0,22m |
| Streckenfehler | 4 | -0,60m | 0,71m | D | 0,01m | 0,18m |
| Streckenfehler | 5 | -0,59m | 0,57m | E | -0,36m | 0,18m |

Tabelle 5.5: Zusammenfassung von Mittelwert und Varianz über die Objekte und Runden der Zeigemethode Laufen – Auswertung des Streckenfehlers

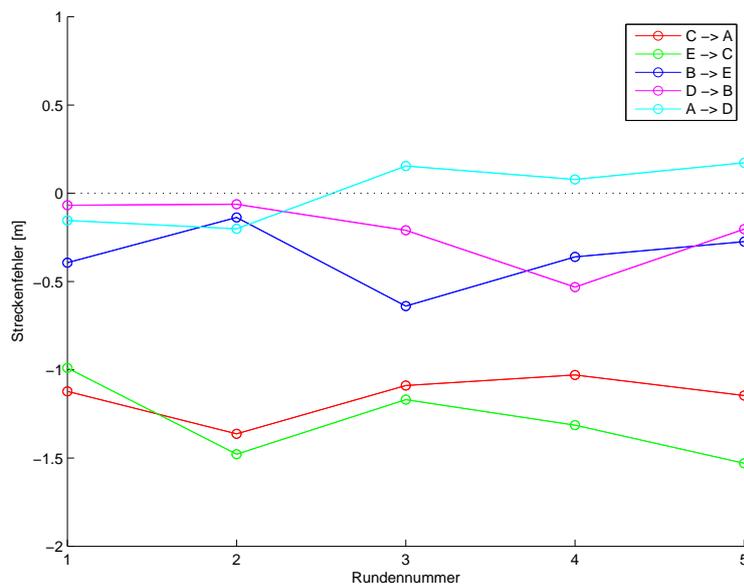


Abbildung 5.13: Streckenfehler der Zeigemethode Laufen. Die Farbkodierung der Objekte entspricht Abb. 5.1.

Objekten A und C am größten. Hier waren die längsten Strecken zu laufen. Man kann deutlich den Unterschied zwischen den Objekten A und B und den Objekten C, D und E erkennen. Die Auswertung des Streckenfehlers bestätigt daher die Auswertung des Distanzfehlers.

In einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) hat sich gezeigt, dass weder die Runden ($p = 0,94$) einen Einfluss auf die Fehler der Versuchsperson haben, noch dass es in einer bestimmten Runde schwieriger oder einfacher war auf ein bestimmtes Objekt zu zeigen ($p = 0,46$). Wieder zeigt sich ein Einfluss der Streckenlänge ($p \ll 0,01$). Die beiden längsten Strecken zu den Objekten A und C ($l > 4,5$ m) sind signifikant von den anderen Strecken verschieden. Sogar die kürzeste Strecke zu Objekt E ($l = 2,0$ m) ist von der Strecke zu Objekt D ($l = 2,6$ m) signifikant verschieden. Auch Abb. 5.13 lässt dieses Ergebnis erahnen. Die Aussagekraft dieser Abbildung wird durch die ANOVA bekräftigt.

Wieder wird die Theorie nicht bestätigt, dass durch die iterierte Dreiecksvervollständigung mit der Zeigemethode Laufen und der Auswertung des Streckenfehlers metrische Informationen in das räumliche Langzeitgedächtnis integriert werden.

5.5 Auswertung der gezeichneten Karten

Bei der iterierten Dreiecksvervollständigung geht die Versuchsperson zwei Schenkel eines Dreiecks ab. Sie läuft vom Startpunkt über den Wegpunkt zum Endpunkt. Am Endpunkt folgt die Zeigeaufgabe, die sich hier in die drei Zeigemethoden, Spiegel, Schauen und Laufen, aufteilt. Danach werden die zwei Schenkel des sich anschließenden Dreiecks abgelaufen, worauf wieder die Zeigeaufgabe folgt. So entstehen aus fünf Punkten insgesamt fünf Dreiecke. Nachdem die Versuchsperson fünf Mal auf jedes Objekt gezeigt, hat endet der Versuch. Anschließend sollten die Versuchspersonen eine Karte der Konfiguration der Objekte anfertigen. Die Objektposition ist auf einem karierten Papier durch ein Kreuz zu kennzeichnen, der Objektname wird daneben platziert.

Die Versuchspersonen konnten bei der Anfertigung der Karten zwei Fehler machen: Die Winkel zwischen den Objekten sind nicht exakt oder die Objekte sind vertauscht. Für die Auswertung der Richtungsabweichung in Abschnitt 5.4.1 und 5.4.2 wurden nur Karten verwendet, in denen die Objekte nicht vertauscht wurden. Eine stilisierte Karte mit allen fünf Objekten und den exakten Winkeln zeigt Abb. 5.14.

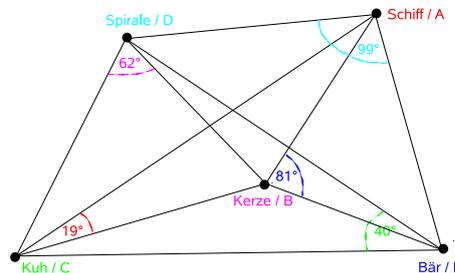


Abbildung 5.14: Stilisierte Karte mit allen fünf Objekten und den zugehörigen Winkeln. Objekte und Winkel sind gemäß Abb. 5.1 farbkodiert.

Der mittlere Fehler bei der Auswertung aller Karten beträgt $f = 15,7^\circ$ mit einer Varianz von $s = 3,9^\circ$. Der größte Fehler ($f_{\text{Obj B}} = 20,29^\circ$) wurde beim innenliegenden Objekt B gemacht. Der kleinste Fehler ($f_{\text{Obj A}} = 9,49^\circ$) wurde bei Objekt A gemacht. Die größten Standardabweichungen ($s_{\text{Obj B, C, D}} > 10,1^\circ$) weisen die Objekte B, C und E auf. Tabelle 5.6 zeigt Mittelwert und Varianz über die Objekte.

Keine der Versuchspersonen konnte eine exakte Karte zeichnen. Da jedes Objekt Start-, Weg- und Zielpunkt sein kann, hängen drei Winkel von ihm ab. Ist also ein Objekt falsch eingezeichnet und vier Objekte sind an der richtigen Position, so sind drei Winkel fehlerhaft. Viele Versuchspersonen haben die grobe Konfiguration der Objekte wahrgenommen und konnten ein innenliegendes Objekt und vier äußere Objekte zeichnen. Dabei wurde oft eine symmetrische Konfiguration, wie z.B. die fünf Augen auf

| Methode | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|---------|--------|------------|---------|
| Karte | A | 9,49° | 6,78° |
| Karte | B | 20,29° | 11,48° |
| Karte | C | 15,26° | 13,34° |
| Karte | D | 16,29° | 8,68° |
| Karte | E | 17,15° | 10,15° |

Tabelle 5.6: Mittelwert und Varianz der gezeichneten Karten

einem Würfel, gezeichnet. Abb. 5.16 zeigt die Karten zweier Versuchspersonen. Beide haben richtig erkannt, dass Objekt B und Objekt E sehr nahe zusammen stehen. Auch die längste Strecke zwischen Objekt A und Objekt C wurde reproduziert. Versuchsperson 18 hat richtig erkannt, dass nur eine kurze Strecke zwischen Objekt A und D ist. Versuchsperson 25 hat erkannt, dass der Winkel von Objekt A zu Objekt D größer als ein rechter Winkel ist. Versuchsperson 25 hat auch erkannt, dass die Strecke von Objekt E zu Objekt C sehr lang ist, dies hat Versuchsperson 18 unterschätzt. Abb. 5.15 zeigt die stilisierten Karten der beiden Versuchspersonen. Für die Auswertung wurden die gezeichneten Karten mit Hilfslinien versehen, um die Winkel leichter zu messen. Beide Abbildungen zeigen die Hilfslinien, die Objekte und die gemessenen Winkel. Die Farbkodierung ist gemäß Abb. 5.1.

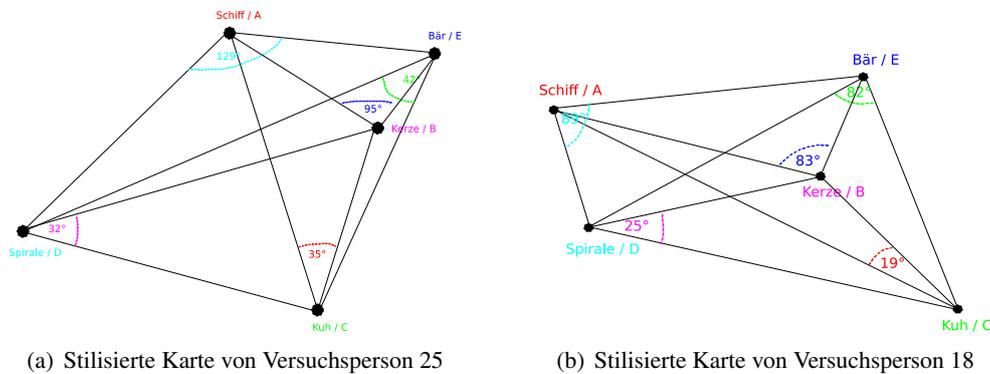
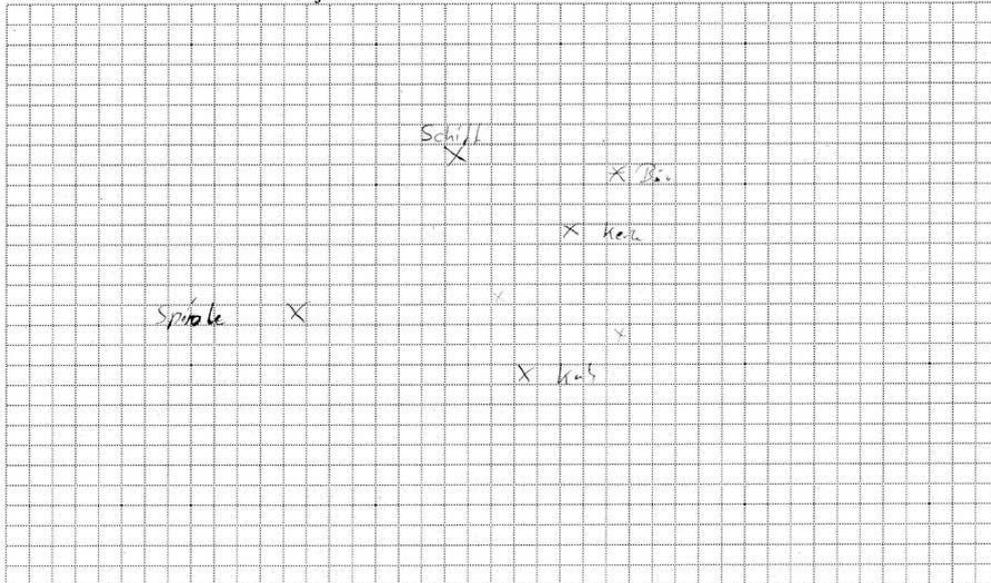


Abbildung 5.15: Stilisierte Karten zweier Versuchspersonen. Zu sehen sind die Objekte und die dazugehörigen Winkel. Die Farbkodierung entspricht Abb. 5.1.

Die absoluten Fehler, die Differenz zwischen Soll- und Istwinkel, der verschiedenen Objekte wurden für eine einfaktorielles Varianzanalyse (ANOVA) benutzt. Dabei zeigen sich wenig Abhängigkeiten ($p = 0,08$). Trotzdem sind das Startobjekt A und das innenliegende Objekt B signifikant unterschiedlich.

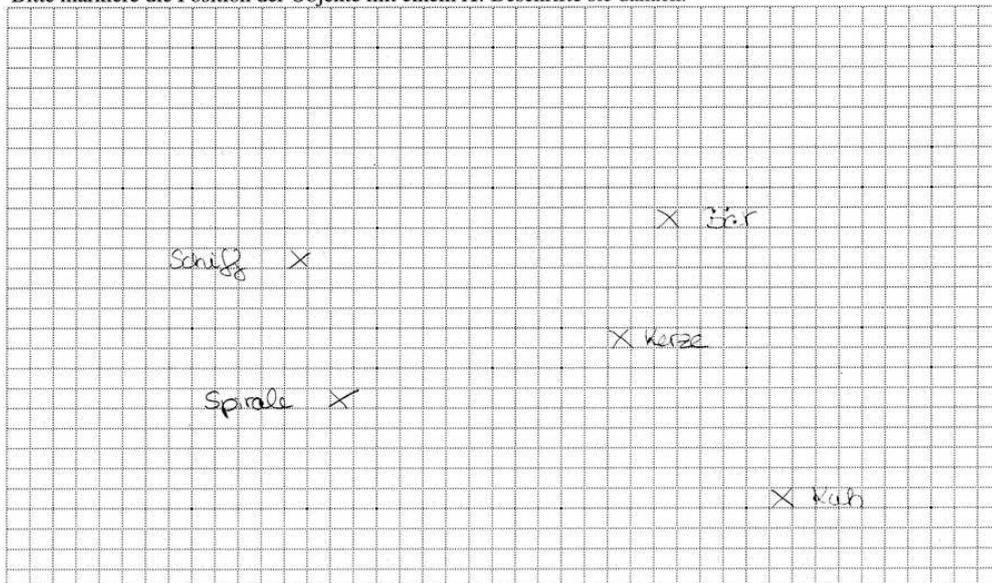
Es zeigt sich kein Hinweis auf metrische Informationen in kognitiven Karten. Keine Versuchsperson konnte eine geografische Karte anfertigen.

Bitte markiere die Position der Objekte mit einem X! Beschrifte sie danach.



(a) Gezeichnete Karte von Versuchsperson 25

Bitte markiere die Position der Objekte mit einem X! Beschrifte sie danach.



(b) Gezeichnete Karte von Versuchsperson 18

Abbildung 5.16: Gezeichnete Karten zweier Versuchspersonen. Die Versuchspersonen sollten die Stelle der Objekte mit einem Kreuz markieren und sie mit der jeweiligen Landmarke beschriften.

5.6 Diskussion der Ergebnisse

Ziel dieses Versuchs war es mit Hilfe der iterierten Dreiecksvervollständigung Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu finden. Während des Versuchs wurde eine kognitive Karte im räumlichen Langzeitgedächtnis angelegt. Die kognitive Karte sollte mit metrischen Informationen versehen werden, die durch die Wegintegration bereitgestellt werden. Die Informationen, welche die Wegintegration bereitstellt, werden durch die verschiedenen Zeigemethoden überprüft. Die Auswertung der verschiedenen Zeigemethoden stellt allgemein Fehler in Grad und in Meter zur Verfügung. Diese Fehler können gut mit der Literatur verglichen werden.

5.6.1 Vergleich mit der Literatur

Die iterierte Dreiecksvervollständigung wurde von Schoch [2009] entwickelt. Diese neue Versuchsmethode ist daher in der Literatur noch nicht zu finden. Daher werden im Folgenden die Ergebnisse dieser Arbeit mit der üblichen Dreiecksvervollständigung, die in Abschnitt 2.1.2 auf Seite 4 beschrieben wurde, verglichen.

Vergleich mit Riecke et al. [2002]

Riecke et al. [2002] benutzt das Paradigma der Dreiecksvervollständigung um seine Ergebnisse mit vorangegangenen Arbeiten von Peruch, Loomis und Klatzky zu vergleichen. Das Experiment *landmarks* von Riecke et al. [2002] ist ähnlich zu dem Versuchsaufbau in dieser Diplomarbeit. Es findet auch in einer virtuellen Umgebung statt, benutzt aber eine gekrümmte Leinwand und kein HMD. Riecke generiert immer neue Dreiecke, deren Position zufällig ist. Der wichtigste Unterschied ist jedoch, dass Riecke in seiner Umgebung feste und eindeutige Landmarken benutzt. Die Versuchsperson kann daher mit Hilfe von Landmarken navigieren und ist nicht nur auf die Wegintegration angewiesen. Daher kann man den kleinen mittleren Fehler $f_{\text{Riecke}_{\text{landmarks}}} \approx 4^\circ$ im Gegensatz zum großen mittleren Fehler der Zeigemethoden Spiegel und Schauen $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$ leicht nachvollziehen. Die Navigation mit Landmarken ist genauer, als die Navigation allein durch Wegintegration (Riecke et al. [2002], Riecke [2003]).

Der Versuch *town & blobs* von Riecke et al. [2002] benutzt das gleiche Versuchslayout wie das Experiment *landmarks*. Wieder hat Riecke eine gekrümmte Leinwand benutzt und mit der Dreiecksvervollständigung gearbeitet. Mit dem Unterschied, dass sich die Versuchspersonen nur auf Wegintegration verlassen können, da die festen oder die verlässlichen Landmarken entfernt wurden. Daher ist der Versuch *town & blobs* der vorliegenden Arbeit viel ähnlicher, als der oben erwähnte Versuch *landmarks*. In der Bedingung *blobs* waren während der ganzen Zeit zufällige Punktmuster zu sehen, ähnlich der für den Boden verwendeten Grastextur. In der Bedingung *town* wird ein Stadthintergrund benutzt. Dieser wird gewechselt sobald die Zeigeaufgabe beginnt. Somit sind alle verlässlichen Landmarken ausgetauscht worden, man kann nur noch Wegintegration als Navigationsstrategie benutzen. Der Fehler liegt bei $f_{\text{Riecke}_{\text{town\&blobs}}} \approx 18^\circ$, also sehr nahe an $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. Riecke vergleicht die absoluten Fehler in seinen Versuchen mit den absoluten Fehlern der Versuche von Peruch und Loomis, die höhere Fehler $f_{\text{Peruch, Loomis}} > 24^\circ$ angeben. Die Versuchspersonen in der vorliegenden Arbeit schnitten also im Vergleich gut ab ($f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$).

Es lassen sich nicht nur die absoluten Fehler in Grad mit Riecke et al. [2002] vergleichen, sondern auch absolute Fehler in der Länge der Strecke. Es wird also nicht betrachtet, ob die Strecke unter- oder überschätzt wurde. Riecke hat die Versuchsdaten von Peruch und Loomis skaliert und so auf seine Laufstrecke ($l = 70$ m) angepasst. Der Fehler liegt bei $f_{\text{Riecke}_{\text{town \& blobs}}} \approx 18\%$, $f_{\text{Peruch}} \approx 25\%$, $f_{\text{Loomis}} \approx 21\%$, und hier bei $f_{\text{Hopf}} \approx 15\%$. Die Versuchspersonen im Experiment der iterierten Dreiecksvervollständigung schnitten also gut ab. Allerdings ist zu beachten, dass die längste Strecke nur $l = 4,8$ m beträgt, bei Riecke sind es $l = 70$ m.

Vergleich mit Klatzky et al. [1998]

In Klatzky et al. [1998] wird der Richtungsfehler unter verschiedenen Bedingungen betrachtet. Die Bedingungen *real-turn* und *walk* sind der vorliegenden Arbeit ähnlich. In der Bedingung *walk* muss die Versuchsperson die Dreiecksvervollständigung mit verbundenen Augen bewältigen. Der Fehler beträgt dabei $f_{\text{Klatzky}_{\text{walk}}} \approx 15^\circ$, ist also etwas kleiner als der Fehler $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. Bei der Bedingung *real-turn* wird ein HMD benutzt. Die Versuchspersonen sitzen allerdings auf einem Stuhl und bewegen sich nicht frei im Raum. Die Vorwärtsbewegungen vom Startobjekt zum Wegobjekt und vom Wegobjekt zum Endobjekt werden über den optischen Fluss simuliert. Nur die Drehung am Wegobjekt wird über ein Drehen des Stuhls auch vestibulär wahrgenommen. Der Fehler ist hier etwas höher $f_{\text{Klatzky}_{\text{real-turn}}} \approx 20^\circ$ und deckt sich mit dem Fehler in dieser Arbeit. In anderen Bedingungen blieben die Versuchspersonen immer unbewegt und konnten daher Drehungen nur über den optischen Fluss wahrnehmen. Die Fehler sind dabei höher. Daher schließt Klatzky, dass es wichtig für eine genaue Zeigeaufgabe ist, eine Drehung auch vestibulär zu empfinden. Die Fehler in den unbewegten Bedingungen sind höher und nehmen zu, je größer die Drehung am Objekt ist. Auch in dem Versuch der vorliegenden Arbeit hängt der Fehler in der Zeigemethode Spiegel vom Objekt ab ($p \ll 0,01$). Allerdings sind diese Unterschiede nicht auf die Winkelgrößen zurückzuführen. Objekt D ist zu Objekt B und E verschieden. Der Winkel am Wegpunkt zu Objekt D ist allerdings weder der größte noch der kleinste, genau wie am Endpunkt B auch. Auch die Winkel am Wegpunkt zu Objekt B oder E, bzw. am Endpunkt sind nicht die größten oder kleinsten. In der Zeigemethode Schauen besteht keine Abhängigkeit ($p = 0,43$) zwischen der Leistung der Versuchsperson und den Objekten, was sich mit den Ergebnissen von Klatzky et al. [1998] deckt, da die Versuchspersonen Drehung und Bewegung über den optischen Fluss sowie über vestibuläre Rezeptoren wahrnehmen.

Klatzky konnte aufgrund des Versuchsdesigns keine Fehler in Meter messen. Daher können keine Distanzfehler oder Streckenfehler verglichen werden.

Vergleich mit Foo et al. [2005]

Foo et al. [2005] beschreibt einen weiteren Versuch, der eng mit unserem verknüpft ist. Auch er untersucht das räumliche Gedächtnis auf metrische Winkel und Distanzen in Navigationsaufgaben. Er benutzt ein HMD, mit welchem sich die Versuchsperson frei im Raum bewegen kann und unterscheidet die Bedingungen *Wüste* und *Wald*. Dabei nutzt Foo eine Dreiecksvervollständigung, die modifiziert ausgeführt wird. Die Versuchspersonen lernen den Weg vom Startpunkt zu zwei verschiedenen Punkten. In un-

serem Fall also die Strecke von Objekt A zu Objekt B und von Objekt A zu Objekt C. Die Versuchspersonen sind dabei in der Lage diese Strecken exakt zu reproduzieren. Anschließend soll die Versuchsperson den unbekanntem Weg von Objekt B zu Objekt C, bzw. von Objekt C zu Objekt B gehen. Informationen über diese Strecke kann die Versuchsperson allerdings nicht durch Wegintegration erhalten. Hier benötigt sie Überblickswissen (*survey knowledge*). Der Richtungsfehler beträgt hier $f_{\text{Foo}} = 19^\circ$ mit einer großen Streuung von $s_{\text{Foo}} = 24^\circ$.

Obwohl die Versuchspersonen exakt die Strecken von Objekt A zu Objekt B und von Objekt A zu Objekt C reproduzieren können, sind sie nicht in der Lage exakte Abkürzungen zu finden. Daher legt Foo nahe, dass die Navigation beim Menschen nicht auf kognitiven Karten mit metrischen Informationen aufbaut. Er schließt weitere Experimente an und zieht dabei den Schluss, dass Menschen Wissen über bestimmte Routen nicht in eine metrische kognitive Karte integrieren. Allerdings kann, nach Foo, ein gewisses Überblickswissen durch Wegintegration erworben werden, dieses ist jedoch auch nicht metrisch.

Das Versuchsdesign von Foo lässt auch eine Berechnung von Fehlern in Metern zu. Um seine Ergebnisse mit den Ergebnissen dieser Diplomarbeit zu vergleichen, werden keine absoluten Strecken betrachtet, sondern um wieviel Prozent die Strecke falsch reproduziert wird. Bei Foo konnte ein Fehler von $f_{\text{Foo}} \approx 25\%$ berechnet werden, in der vorliegenden Arbeit sind es $f_{\text{Hopf}} \approx 15\%$. Der Fehler der Versuchspersonen ist also deutlich kleiner. Die Wegintegration scheint etwas genauer zu sein, als reines Überblickswissen.

Vergleich mit Kearns et al. [2002]

Auch Kearns et al. [2002] benutzt die Dreiecksvervollständigung in einer virtuellen Realität. Die Versuchspersonen können sich mit einem HMD frei bewegen. Kearns benutzt drei verschiedene Versuchsumgebungen, eine mit einer zufälligen Textur an Wand und Fußboden (Bedingung B), eine mit einer grauen Wand und einer zufälligen Textur auf dem Fußboden (Bedingung F) und eine Versuchsumgebung ohne Textur (Bedingung N). In diesen drei Bedingungen bietet Bedingung B sehr viel optischen Fluss, Bedingung N fast keinen optischen Fluss und Bedingung F ist dazwischen.

Im Mittel beträgt der absolute Zeigefehler $f_{\text{Kearns}} \approx 12,3^\circ$, er ist damit etwas kleiner als $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. Zwei von den zu zeigenden Winkeln entsprechen Winkeln der iterierten Dreiecksvervollständigung. $f_{\text{Kearns}_{40^\circ}} = 3,3^\circ$ kann verglichen werden mit dem Zeigefehler $f_{\text{Obj C}} \approx 20^\circ$ aus diesem Versuch und $f_{\text{Kearns}_{62^\circ}} = 18,8^\circ$ mit $f_{\text{Obj B}} \approx 20^\circ$. Bei einem 40° Winkel haben die Versuchspersonen bei Kearns viel besser abgeschnitten, bei einem Winkel von 62° ist der Zeigefehler fast gleich. Die Fehler der unterschiedlichen Bedingungen und Winkel liegen bei Kearns zwischen $f_{\text{Kearns}} = 0,4^\circ$ und $f_{\text{Kearns}} = 45,8^\circ$.

Der durchschnittliche Fehler beim Reproduzieren der Länge der Strecke liegt in der vorliegenden Arbeit bei $f_{\text{Hopf}} \approx 14,9\%$, bei Kearns ist er viel niedriger $f_{\text{Kearns}} \approx 2,7\%$. Die Streckenlängen an sich liegen zwischen 2 m und 4,8 m, bei Kearns zwischen 3,7 m und 5,7 m. Somit ist die Streckenlänge nicht viel größer als bei der iterierten Dreiecksvervollständigung.

Die Zeigeleistung der Versuchspersonen hängen bei Kearns nicht von der Bedingung ab, der optische Fluss hat daher kaum Auswirkung. Zum Vergleich haben Kearns et al.

[2002] den gleichen Versuch mit unbewegten Versuchspersonen auf einem Stuhl sitzend gemacht. Die Versuchspersonen schlossen dabei schlechter ab und die Bedingungen unterschieden sich signifikant voneinander ($p < 0,01$). Die Wegintegration kann daher zwar mit Hilfe des optischen Flusses bewältigt werden, allerdings scheint es, dass die Orientierung des Menschen mehr von propriozeptischen, vestibulären oder efferenten Informationen abhängt.

Vergleich mit Ishikawa, Montello [2006]

Ishikawa, Montello [2006] haben ebenfalls einen ähnlichen Versuch durchgeführt. Dieser Versuch benutzt keine virtuelle Realität, sondern einen hügeligen Landstrich. Dieser Landstrich bietet viele, kurvige Straßen und wenige, weit entfernte Landmarken, die zur Orientierung dienen könnten. Die zu lernenden Routen waren 2,2 km lang und wurden mit dem Auto abgefahren. Auf den Routen befinden sich mehrere Plätze, z.B. weißes Tor, rote Backsteinmauer, grüne Kiste u.ä. Von diesen Plätzen aus sollten die Versuchspersonen auf einen anderen Platz zeigen. Im Mittel fanden Ishikawa und Montello absolute Zeigefehler von $f_{\text{Ishikawa}} > 40^\circ$. Auch bei Ishikawa und Montello konnte wie in der vorliegenden Arbeit kein Lerneffekt gefunden werden. Die Autoren liefern ein sehr interessantes Ergebnis. Ihrer Meinung nach sollte differenziert werden zwischen Versuchspersonen, die eine gute bis sehr gute Leistung erbringen, und Versuchspersonen, die eine durchschnittliche oder schlechte Leistung aufweisen. Die wichtigste Implikation ihrer Arbeit ist dann, dass manche Menschen metrische Informationen nutzen können und andere nicht. Eine solche Tendenz zeigt sich auch in diesem Versuch (Abschnitt 5.2). Während Versuchsperson 12 eine sehr gute Leistung erzielt, ist Versuchsperson 11 kontinuierlich schlecht. Versuchsperson 12 zeigt zwar keine Lernkurve, hat aber von Anfang an einen Überblick. Eventuell konnte Versuchsperson 12 sehr schnell eine gute und genaue kognitive Karte aufbauen, die auch ohne Metrik auskommt. Sie verwendete dabei noch unbekannte Navigationsstrategien oder -mechanismen. Versuchsperson 11 braucht vielleicht länger um eine ebenso gute kognitive Karte aufzubauen.

Auch bei Ishikawa und Montello wurden keine Distanzen ausgewertet, mit denen die Ergebnisse der iterierten Dreiecksvervollständigung verglichen werden könnten.

Vergleich mit Meilinger et al. [2007]

Meilinger et al. [2007] haben einen Versuch in virtueller Realität entwickelt, um räumliche Orientierung zu überprüfen. Sie wollen Hinweise geben, ob räumliche Information orientierungsunabhängig, orientierungsabhängig von einer Referenzrichtung oder orientierungsabhängig von einer erlebten Blickrichtung ist. Hierzu sollten die Versuchspersonen mit einem HMD einen in sich geschlossenen Gang abgehen, in dem sich mehrere Objekte befinden. Nachdem sie alle Objekte richtig benennen können, wurden sie an eine zufällige Stelle mit einer bestimmten Blickrichtung im Gang gestellt. Die Blickrichtung war entweder zufällig, entsprach einer Referenzrichtung oder war die in der Testphase erlebte Blickrichtung. Nachdem sich die Versuchspersonen orientiert haben, wurde ein bekanntes Objekt eingeblendet. Von ihrer jetzigen Position sollen die Versuchspersonen nun anzeigen in welcher Richtung sich das bekannte Objekt befindet. Die Ergebnisse unterstützen die Theorie einer orientierungs-

abhängigen und erlebten Blickrichtung. Die Versuchspersonen konnten sich schneller orientieren und auch genauer in die Richtung des Objektes zeigen, wenn ihre jetzige Orientierung dieselbe ist, die sie zuvor in der Trainingsphase kennen gelernt haben. Dies widerspricht allerdings laut den Autoren der Annahme, dass die mentale Repräsentation für Umgebungen orientierungsunabhängig sind. Die absoluten Fehler $f_{\text{Meilinger}_{\text{Referenzrichtung}}} \approx 45^\circ$, $f_{\text{Meilinger}_{\text{erlebte Richtung}}} \approx 35^\circ$ sind höher als die in der vorliegenden Arbeit ermittelten $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. Das Versuchslayout von Meilinger et al. [2007] ist allerdings komplexer als das Versuchslayout der vorliegenden Arbeit, da mehr Objekte verwendet werden und die Objekte, aufgrund des Gangs, nie alle gleichzeitig gesehen werden können. Dies könnte die Ursache für die höheren Fehler bei Meilinger sein.

Bestätigt sich allerdings die Theorie für eine von der erlebten Blickrichtung abhängige räumliche Orientierung, könnte der absolute Fehler $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$ erklärt werden. Die Versuchsperson läuft von Objekt A über Objekt B zu Objekt C, an Objekt C folgen die drei Zeigemethoden. Es entstehen zwei bekannte Blickrichtungen, von Objekt A zu Objekt B und von Objekt B zu Objekt C. Wenn die Zeigemethode Laufen beendet ist, muss die Versuchsperson von ihrer aktuellen Position, im Idealfall Objekt A, zurück zu Objekt C laufen. Dadurch wird eine weitere bekannte Blickrichtung von Objekt A zu Objekt C hinzugefügt. Das nächste Dreieck beginnt bei Objekt C und geht über Objekt D zu Objekt E. Den Versuchspersonen ist es daher nie möglich das Startobjekt aus einer schon bekannten Blickrichtung anzuzeigen. Lediglich die Richtung vom Startpunkt weg zum Endpunkt ist in der nächsten Runde bekannt. Falls diese, in der bekannten Blickrichtung enthaltene, Information von Objekt A zu Objekt C am Endpunkt C negiert eingesetzt werden kann, so wäre eine Lernkurve zu erwarten. Andere Informationen, die der Versuchsperson helfen würden, die Aufgabe hier zu lösen, sind nicht in der kognitiven Karte gespeichert.

Das Versuchslayout von Meilinger lässt zur Fehlerauswertung keine Distanzen zu. Daher konnten nur Fehler in Grad verglichen werden.

5.6.2 Vergleich der Ergebnisse mit Schoch [2009]

Schoch [2009] benutzt eine gekrümmte Leinwand und die Zeigemethode Kompass, um Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis zu suchen. Es wird zwischen der Bedingung *drei Objekte* und der Bedingung *fünf Objekte* unterschieden. Schoch benutzt einen Hintergrund, der aus einer Stadt, einem Dorf, einem Strand und einem Wald besteht. Diese vier Hintergründe können von der Versuchsperson genutzt werden, um die vier Himmelsrichtungen grob abzuschätzen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Zeigeaufgabe auf die drei Zeigemethoden, Spiegel, Schauen und Laufen, erweitert, dabei gibt es nur die Bedingung *fünf Objekte* und keine verlässlichen Landmarken oder keine groben Richtungsinformationen.

Bei der iterierten Dreiecksvervollständigung von Schoch mit drei Objekten nimmt die Zeigepräzision der Versuchspersonen mit zunehmender Rundenzahl zu ($p \ll 0,01$). Nach der zweiten Zeigeaufgabe sind der Versuchsperson alle Strecken bekannt. Da bei drei Objekten alle Strecken, auf welche die Versuchsperson zeigen soll, vorher auch gelaufen und somit gelernt wurden. Beim 90° Winkel beträgt der Richtungsfehler $7,1^\circ$, beim 60° Winkel $8,9^\circ$ und beim 30° Winkel $1,4^\circ$. Diese Fehler sind viel kleiner als $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. In der Bedingung *drei Objekte* von Schoch [2009] wurden

also Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis gefunden. Dieses Versuchsergebnis steht mit der Aussage von Meilinger et al. [2007] im Zusammenhang. Meilinger schlägt eine kognitive Karte vor, in der die Informationen abhängig von einer erlebten Blickrichtung kodiert sind. In Schoch [2009] sind der Versuchsperson alle Strecken bekannt. Die Strecke von Objekt A zu Objekt B enthält eine bekannte Blickrichtung, sowie die Strecke von Objekt B zu Objekt C. Nach der ersten Zeigeaufgabe beginnt das Dreieck mit dem Startpunkt C. Nun ist auch die Strecke von Objekt C zu Objekt A bekannt und die erlebte Blickrichtung wird in die kognitive Karte eingefügt. Die kognitive Karte enthält alle erlebten Blickrichtungen der Strecken und metrische Informationen. Beim zurückzeigen auf ein Objekt können diese Informationen unverändert benutzt werden. Da aus einer schon bekannten und gelernten Blickrichtung auf das Startobjekt zu zeigen ist.

In der Bedingung *fünf Objekte* ist die Konfiguration der Objekte sehr ähnlich zu der vorliegenden Arbeit. In dieser Versuchsreihe zeigt sich keine Lernkurve ($p = 0,23$), die Zeigeleistung der Versuchsteilnehmer verändert sich also nicht mit zunehmender Rundenzahl. Der durchschnittliche Fehler liegt bei $f_{\text{Schoch}} \approx 10^\circ$, er ist also viel niedriger als hier $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. Da es bei der Bedingung *drei Objekte* eine Lernkurve gab, stellt sich eine Frage: Ist die Zeigemethode und das Versuchslayout genau auf die Fragestellung angepasst? In Klatzky et al. [1998] wurde schließlich angedeutet, dass Drehungen deutlich besser ausgeführt werden, wenn man sie auch vestibulär wahrnimmt. Der optische Fluss reicht bei Klatzky für eine exakte Drehung nicht aus. In Schoch [2009] saßen die Versuchspersonen unbewegt auf einem Stuhl. Daher sollte das Versuchslayout so verändert werden, dass die Versuchspersonen alle Drehungen auch vestibulär wahrnehmen können. Auch Kearns et al. [2002] berichten, dass die Navigationsleistung zunimmt, wenn der Mensch mehr Reizen ausgesetzt ist als nur dem optischen Fluss. Eine Wegintegrationsaufgabe mit einem HMD bei freier Bewegung im Raum ist signifikant besser, als die gleiche Aufgabe mit HMD bei Bewegung mithilfe eines Joysticks. Daher werden die Teilergebnisse von Klatzky et al. [1998] und Kearns et al. [2002] benutzt um das Versuchslayout von Schoch zu verfeinern, was zu dieser Diplomarbeit geführt hat. Trotzdem konnte keine Lernkurve gefunden werden, der Fehler ist sogar größer $f_{\text{Hopf}} \approx 20^\circ$. Eine Veränderung des Versuchslayout bringt keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel 5 wurden die erhobenen Versuchsdaten ausführlich ausgewertet und mit der Literatur verglichen. Dazu wurden zuerst einige Versuchspersonen von der Auswertung ausgeschlossen. Die Versuchspersonen nahmen entweder nicht am Hauptversuch teil, sondern halfen die Zeigemethoden iterativ zu verbessern, oder ihre Zeigeleistung war so schlecht, dass sie als Ausreißer bezeichnet wurden. Die Fehler dieser Ausreißer waren dreimal höher als die der restlichen Versuchspersonen.

Danach wurden die Rohdaten, welche mit einer Frequenz von 60 Hz erhoben wurden, visualisiert. Dabei zeigten sich große, aber keine signifikanten Unterschiede zwischen

den Versuchspersonen. Viele Versuchspersonen konnten die Konfiguration der Objekte gut wiedergeben.

Der Richtungsfehler, ein Fehler in Grad mit Vorzeichen, wurde als nächstes betrachtet. Dieser Fehler tritt nur bei den Zeigemethoden Spiegel und Schauen auf. Interessant war hierbei, dass die Versuchspersonen im Mittel bei der Zeigemethode Spiegel rechts an Objekt A ($f_{\text{Obj A Spiegel}} = 15, 0^\circ$) vorbei gezeigt haben, bei der Zeigemethode Schauen allerdings links ($f_{\text{Obj A Schauen}} = -10, 2^\circ$) vorbeigezeigt. Desweiteren war der größte Richtungsfehler bei der Zeigemethode Spiegel bei Objekt D zu finden ($f_{\text{Obj D Spiegel}} = -16, 6^\circ$), bei der Zeigemethode Schauen konnte auf Objekt D besser gezeigt werden ($f_{\text{Obj D Schauen}} = -5, 8^\circ$).

Anschließend wurde der absolute Fehler in Grad der beiden Zeigemethoden Spiegel und Schauen ausgewertet. Bei der Zeigemethode Spiegel unterscheidet sich der Fehler an Objekt D ($f_{\text{Obj D Spiegel}} = 25, 3^\circ$) signifikant von den Fehlern an den Objekten B ($f_{\text{Obj B Spiegel}} = 14, 5^\circ$) und E ($f_{\text{Obj E Spiegel}} = 17, 4^\circ$). Die Rundenfehler unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, der höchste Rundenfehler tritt in der dritten Runde auf $f_{\text{Runde 3 Spiegel}} = 22, 1^\circ$, der niedrigste in Runde 5 $f_{\text{Runde 5 Spiegel}} = 17, 6^\circ$. Dieser Trend sollte ausgenutzt werden. Hier wurden zwar keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis gefunden, aber mehr Durchgänge könnten diesen Trend eventuell bestätigen.

Die Fehler der Zeigemethode Schauen und Spiegel ähneln sich sehr. Die Zeigemethode hat keinen Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen. Die Rundenummer der Zeigemethode Schauen hat keinen Einfluss auf die Leistung der Versuchspersonen. Trotzdem hat auch sie ihren größten Fehler in Runde 3 $f_{\text{Runde 3 Schauen}} = 21, 3^\circ$ und ihren kleinsten in Runde 5 $f_{\text{Runde 5 Schauen}} = 17, 5^\circ$. Dieser Trend sollte auch ausgenutzt werden, obwohl auch hier keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis gefunden wurden.

Bei der Zeigemethode Laufen werden die Fehler in Meter angegeben. Es konnte unterschieden werden zwischen einem Distanz- und einem Streckenfehler. Der Distanzfehler bezeichnet den Abstand zwischen der Position der Versuchsperson und der Objektposition, der Streckenfehler ist die Differenz aus der Strecke, welche die Versuchsperson zurücklegt, und der tatsächlichen Strecke. Bei der Auswertung des Distanzfehlers konnte kein Trend in den Runden, wie in den Zeigemethoden Spiegel und Schauen, festgestellt werden. Die Objekte A und C sind signifikant von den anderen Objekten verschieden. Der Abstand zwischen der Position der Versuchsperson und der Objektposition war bei Objekt A ($f_{\text{Obj A}} = 1, 8 \text{ m}$), zu Objekt C ($f_{\text{Obj C}} = 1, 7 \text{ m}$).

Bei der Auswertung des Streckenfehlers hat sich herausgestellt, dass alle Strecken unterschätzt werden. Die Strecken zu Objekt A und zu Objekt C sind wieder signifikant von den anderen Strecken verschieden. Sie wurden um 1, 2 m unterschätzt. Auch hier zeigt sich kein Trend in den Runden. Daher konnten auch bei der Zeigemethode Laufen keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis gefunden werden.

Schließlich wurden die gezeichneten Karten ausgewertet. Dabei wurde das innenliegende Objekt B am Schlechtesten gezeichnet. Es ist signifikant vom ersten Startobjekt, Objekt A, welches am Besten dargestellt wurde, verschieden.

Als Letztes wurden die hier vorgestellten Ergebnisse mit denen der Literatur verglichen. Die hier gemachten Zeigefehler in Grad und Meter unterscheiden sich kaum von anderen Experimenten. Im Vergleich zu Schoch [2009] sind die Fehler zwar höher, aber auch bei Schoch hat sich keine Lernkurve gezeigt.

Die iterierte Dreiecksvervollständigung mit ihren drei Zeigemethoden in virtueller Umgebung hat keine Hinweise auf metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis gezeigt. Der durchschnittliche Fehler der Zeigeaufgabe ist 20° und 1 m. Tabelle 5.7 zeigt eine Zusammenfassung aller Durchschnittswerte je Runde. Die Fehler wurden über alle Versuchspersonen und Objekte gemittelt. In keiner Zeigemethode wurden Hinweise auf metrische Informationen gefunden. Eine Zusammenfassung des Durchschnitts je Objekt aller Zeigemethoden zeigt Tabelle 5.8. Es wurde über alle Versuchspersonen und Runden gemittelt. Dabei sind die Objekte teilweise signifikant voneinander unterschiedlich, aber ein Effekt, der Hinweise auf metrische Informationen liefert, bleibt aus.

| Methode | Durchgang | Mittelwert | Varianz |
|----------------|-----------|---------------|--------------|
| Spiegel | 1 | $18,65^\circ$ | $4,19^\circ$ |
| Spiegel | 2 | $19,98^\circ$ | $4,91^\circ$ |
| Spiegel | 3 | $22,08^\circ$ | $5,53^\circ$ |
| Spiegel | 4 | $18,04^\circ$ | $5,22^\circ$ |
| Spiegel | 5 | $17,55^\circ$ | $5,57^\circ$ |
| Schauen | 1 | $19,64^\circ$ | $3,98^\circ$ |
| Schauen | 2 | $18,80^\circ$ | $2,66^\circ$ |
| Schauen | 3 | $21,27^\circ$ | $5,20^\circ$ |
| Schauen | 4 | $20,02^\circ$ | $2,44^\circ$ |
| Schauen | 5 | $17,48^\circ$ | $3,76^\circ$ |
| Distanzfehler | 1 | 1,26m | 0,3m |
| Distanzfehler | 2 | 1,34m | 0,7m |
| Distanzfehler | 3 | 1,21m | 0,3m |
| Distanzfehler | 4 | 1,20m | 0,5m |
| Distanzfehler | 5 | 1,29m | 0,3m |
| Streckenfehler | 1 | -0,55m | 0,48m |
| Streckenfehler | 2 | -0,63m | 0,55m |
| Streckenfehler | 3 | -0,65m | 0,71m |
| Streckenfehler | 4 | -0,60m | 0,71m |
| Streckenfehler | 5 | -0,59m | 0,57m |

Tabelle 5.7: Zusammenfassung der Statistik über die Runden

| Methode | Objekt | Mittelwert | Varianz |
|----------------|--------|------------|---------|
| Spiegel | A | 19,87° | 3,60° |
| Spiegel | B | 14,51° | 2,26° |
| Spiegel | C | 19,23° | 5,32° |
| Spiegel | D | 25,28° | 4,23° |
| Spiegel | E | 17,39° | 5,57° |
| Schauen | A | 21,16° | 2,53° |
| Schauen | B | 20,00° | 4,92° |
| Schauen | C | 20,31° | 3,16° |
| Schauen | D | 20,05° | 3,64° |
| Schauen | E | 15,70° | 1,78° |
| Distanzfehler | A | 1,82m | 0,16m |
| Distanzfehler | B | 0,93m | 0,15m |
| Distanzfehler | C | 1,67m | 0,20m |
| Distanzfehler | D | 0,98m | 0,06m |
| Distanzfehler | E | 0,89m | 0,15m |
| Streckenfehler | A | -1,15m | 0,13m |
| Streckenfehler | B | -0,21m | 0,19m |
| Streckenfehler | C | -1,19m | 0,22m |
| Streckenfehler | D | 0,01m | 0,18m |
| Streckenfehler | E | -0,36m | 0,18m |
| Karte | A | 9,49° | 6,78° |
| Karte | B | 20,29° | 11,48° |
| Karte | C | 15,26° | 13,34° |
| Karte | D | 16,29° | 8,68° |
| Karte | E | 17,15° | 10,15° |

Tabelle 5.8: Zusammenfassung der Statistik über die Objekte

6 Ausblick

Die iterierte Dreiecksvervollständigung bietet viele Möglichkeiten das räumliche Langzeitgedächtnis zu untersuchen. In dieser Arbeit wurde sie benutzt, um Hinweise auf metrische Informationen zu suchen. Dazu wurde eine virtuelle Umgebung entworfen in der sich die Versuchsperson mithilfe eines HMD frei bewegen konnte. Die dabei ermittelten Daten zeigten keine Lernkurve, die auf metrische Informationen schließen lassen.

6.1 Weiterführung des Versuchslayouts

Als generelles Problem in diesem Versuch stellte sich heraus, dass die Versuchsperson ihren eigenen Körper nicht in der virtuellen Umgebung sehen kann. Besonders nachdem die Versuchsperson zum Startpunkt zurückgelaufen ist und alle Objekte wieder für sie sichtbar sind. Am Startpunkt kann sie nicht abschätzen wo sie sich genau befindet. Es ist ihr nicht möglich zu erkennen, ob sich ihre Füße auf der Plattform, in der Mitte der Plattform oder neben der Plattform befinden. Daher ist die Leistungsrückmeldung der Zeigemethode Laufen nur sehr ungenau.

Viele Versuchspersonen hatten auch ein unangenehmes Gefühl, da sie sich selbst nicht sehen konnten. Sie fragten meist während der Versuchseinführung, ob das normal sei, die eigenen Füße nicht zu sehen. Andere Versuchspersonen wiederum beschrieben diese Empfindung erst am Ende des Versuches.

Daher wäre es von Vorteil einen Körper in die virtuelle Umgebung einzugliedern. Optimal wäre es, wenn sich die Arme und Beine mit Knie und Ellenbogen in der virtuellen Umgebung genauso wie in der realen Umgebung bewegen würden. Dabei ist darauf zu achten, dass man dafür mehr als nur Reflektorkugeln braucht, damit sie von den Infrarot-Kameras immer gut gesehen werden. Die Reflektorkugeln auf dem Kopf sind sehr einfach zu verfolgen, da sie nicht durch den eigenen Körper verdeckt werden können und somit immer gesehen werden können. Eine Art Reflektorband, das man um das Bein herum anbringt, könnte dabei eine Lösung sein.

6.2 Verbesserung der Ausrüstung

Ein weiteres Problem ist das Gewicht der Versuchsausrüstung. Das Rucksackgestell mit Grafikschnittstelle und Laptop sowie das HMD wiegen zusammen 12 kg. Diese Ausrüstung muss die Versuchsperson eine Stunde tragen. Die Versuchsrunden an sich könnten vielleicht nicht ausreichen um eine kognitive Karte aufzubauen. Daher sollten mehr als fünf Runden wiederholt werden. Dies war aber nicht möglich, da die Versuchsausrüstung zu schwer ist.

6.3 Weitere Versuche der iterierten Dreiecksvervollständigung in virtueller Umgebung

Untersuchung der Feedback Nutzung der Zeigemethode Spiegel

Hier sollte untersucht werden, ob das Feedback, welches die Versuchsperson im Spiegel sieht, genutzt wird. Dazu werden zwei Versuchsgruppen benötigt. Die eine nimmt an dem Versuch, wie er in Abschnitt 4.5.4 beschrieben wurde, teil. Die andere Gruppe bekommt keine Leistungsrückmeldung im Spiegel zu sehen. Unterscheiden sich danach die Ergebnisse der Zeigemethoden Spiegel und Schauen signifikant, so hat die Leistungsrückmeldung im Spiegel eine Auswirkung auf die Zeigeleistung.

Vereinfachte Konfiguration

Anstatt die fünf Punkte, welche die verschiedenen Dreiecke aufspannen, mit deutlich zu unterscheidenden Landmarken zu versehen, wird eine Säule benutzt. Es könnte einfacher sein sich eine stilisierte Landschaft zu merken und mit metrischen Informationen zu bestücken, als ein komplizierte Landschaft mit fünf Objekten.

Wähle die richtige Karte aus

Anstatt die Versuchsperson aufzufordern eine Karte der Objektkonfiguration zu zeichnen, muss sie aus einem Stapel vorhandener Karten die richtige auswählen. Dies könnte einfacher für die Versuchspersonen sein, als selbst eine Karte anzufertigen. Der Zeitpunkt an dem die Karte gewählt wird, kann dabei variieren. So kann die Karte zum Schluß ausgewählt werden, so wie in dieser Arbeit. Man kann aber die Versuchsperson nach einigen Runden auswählen lassen und abermals zum Schluß.

Zeige nach jedem Objekt

Bei der Dreiecksvervollständigung geht eine Versuchsperson vom Startpunkt über einen Wegpunkt zum Zielpunkt. Am Zielpunkt soll sie den Startpunkt anzeigen. Durch die Wegintegration wurde der Heimvektor zum Startpunkt bei jeder Bewegung der Versuchsperson aktualisiert. Der Wegpunkt, Punkt B, wurde dabei vergessen. Nun zeigt die Versuchsperson also von Punkt C auf den Startpunkt, Punkt A. Danach geht die Versuchsperson die Strecke zu Punkt D. Durch die Wegintegration ist der Startpunkt Punkt C noch bekannt. Das nächste Dreieck ist allerdings nicht, wie gewohnt, CDE sondern BCD. Die Versuchsperson soll nun von Punkt D zu Punkt B zeigen. Diese Richtungs- und Distanzinformation kann allerdings nicht mehr durch Wegintegration erhalten werden. Danach geht die Versuchsperson die nächste Strecke zu Punkt E und zeigt wieder auf den vorletzten Punkt, Punkt C. Aber auch dieser Punkt ist durch Wegintegration nicht mehr bekannt.

Sollte es der Versuchsperson trotzdem möglich sein, eine immer bessere Leistung zu erzielen, so wurde keine Metrik im räumlichen Langzeitgedächtnis gefunden.

Benutze einen Umweg

Dieser Versuchsaufbau ist wie gewohnt. Die Versuchsperson geht von Punkt A zu Punkt B zu Punkt C, doch anstatt direkt zu Punkt A zurückzugehen, geht sie den Umweg über Punkt B. Bei der Wegintegration wird Punkt B vergessen, die Versuchsperson sollte es also schwerer haben. Kann die Versuchsperson es trotzdem und kann auch eine Lernkurve nachgewiesen werden, so ist dies ein Hinweis auf metrische Information im räumlichen Langzeitgedächtnis. Dieses Versuchslayout hat natürlich nur dann Sinn, wenn metrische Informationen im räumlichen Langzeitgedächtnis nachgewiesen worden sind. Hierbei kann man eine Idee für die Leistungsfähigkeit der Raumkognition erhalten.

A Versuchsanweisungen

Um allen teilnehmenden Versuchspersonen die gleiche Versuchsinformation zu geben, mussten sie zuerst eine Versuchsanleitung lesen. Danach zogen sie das Rucksackgestell, mit dem Laptop und der Grafikschnittstelle, sowie das HMD auf. Nachdem das HMD auf dem Kopf bequem und fest von der Versuchsperson unter Anleitung justiert wurde, startete die Eingewöhnungsphase. In dieser Eingewöhnungsphase wurden vom Experimentator stets dieselben Fragen gestellt, um die Versuchsperson mit der virtuellen Umgebung vertraut zu machen. Nach der Eingewöhnungsphase startet der Versuch. Der Experimentator beantwortete im Versuch keinerlei Fragen, er griff jedoch ein, wenn die Versuchsperson sich auf eine Wand zubewegte um Kollisionen und Verletzungen zu vermeiden.

Versuchsanleitung

Nachdem Du komplett verkabelt bist und das Programm gestartet hat, wirst Du eine grüne Wiese mit Bergen im Hintergrund sehen. Auf der Wiese stehen dann Objekte, wie zum Beispiel eine Ente. Bevor der eigentliche Versuch beginnt, hast Du natürlich etwas Zeit Dich an die virtuelle Umgebung zu gewöhnen. Dabei wirst Du Dir die Aufgabenstellung einprägen können und den Versuchsablauf erlernen.

Deine primäre Aufgabe ist eine **Navigationsaufgabe**, die ich Dir gleich noch genauer erklären werde. Die zweite Aufgabe ist eine Zeichenaufgabe, dazu musst Du Dir während des Versuchs die Positionen der Objekte einprägen und am Ende des Versuchs eine **Karte** dieser Objekte zeichnen.

Die Navigationsaufgabe besteht aus mehreren Teilen. Zuerst musst Du zu verschiedenen Objekten laufen. Danach kommen drei verschiedene Zeigeaufgaben. Wenn Du damit fertig bist, wiederholt sich der Versuch von vorne.

Du läufst zuerst zu Objekt A, dann von Objekt A zu Objekt B und schließlich zu Objekt C. Damit Du weißt, was eigentlich Objekt A ist, erscheint eine große schwarze Säule und ein schwarzer Kreis bei Objekt A, merke Dir das Objekt, zum Beispiel die Ente. Sobald Du richtig stehst, verschwindet die Säule wieder und vor Dir erscheint ein Spiegel, die Zeigeaufgaben beginnen. Benutze den Spiegel wie eine Art Rückspiegel. Bewege Deinen Kopf, der Spiegel bewegt sich mit Dir, und stelle ihn so ein, dass Du Objekt A hinter Dir sehen können müsstest. Natürlich kannst Du Objekt A nicht im Rückspiegel sehen, sonst wäre der Versuch ja auch sehr einfach. Wenn Du **so genau wie möglich** auf Objekt A gezeigt hast, bestätige dies mit der mittleren Maustaste. Dadurch verschwindet der Spiegel. Um Dir zu zeigen, auf was Du genau gezeigt hast, kannst Du nun im Spiegel die Objekte hinter Dir sehen. Wenn Du es Dir lange genug angeschaut hast, drücke die mittlere Maustaste. Danach beginnt der zweite Teil der Zeigeaufgabe. Drehe Dich **so genau wie möglich** in deine eben gezeigte Richtung,

so als ob Du nun direkt von Deinem Standpunkt (Objekt C) auf Deinen Startpunkt (Objekt A) sehen könntest. Bestätige Deine Wahl mit der mittleren Maustaste. Nun kommt die dritte und letzte Aufgabe. Laufe auf dem **kürzesten Weg** und **möglichst genau** zum Startobjekt A. Bestätige Deinen Standpunkt mit der mittleren Maustaste.

Jetzt wiederholt sich alles. Sobald Du die mittlere Maustaste gedrückt hast, erscheinen wieder alle Objekte. Objekt C, das eben Dein Zielobjekt war, ist nun Dein Startpunkt. Laufe also zu Objekt C, danach zu Objekt D und schließlich zu Objekt E.

Eine kleine Hilfe sich an das Startobjekt, auf das Du zeigen musst, zu erinnern, ist der „Reminder“. Sobald der Spiegel auftaucht, erscheint auch der Reminder und zeigt Dir Objekt A.

Hast Du noch Fragen? Wenn nicht, dann geht es gleich los mit der Eingewöhnungsphase. Keine Sorge, ich bin bei Dir und erkläre Dir Schritt für Schritt, was Du zu tun hast. Erst danach startet der Versuch automatisch.

Eingewöhnungsphase

Versuchsleiter: Du bist hier in der Eingewöhnungsphase und lernst Schritt für Schritt die 3 Zeigemethoden; zuerst einzeln, danach kombiniert.

Versuchsleiter: Der richtige Versuch startet erst danach automatisch, Du musst Dir hier also noch nichts merken!

Versuchsleiter: Schau dich mal um und geh ein paar Schritte! Was siehst Du?

erwartete Antwort der Versuchsperson: Eine Büste, eine Ente, ein Schneemann...

Versuchsleiter: Drück dem Schneemann mal auf die Nase!

erwartete Antwort der Versuchsperson: Der ist auf einmal weg!

Versuchsleiter: Genau, wenn man also nahe an Objekten ist blenden sie immer aus.

Versuchsleiter: Ok, dann drück mal die mittlere Maustaste. Was hat sich verändert?

erwartete Antwort der Versuchsperson: Bei der Ente ist jetzt so eine hohe, schwarze Säule und ein schwarzer Kreis!

Versuchsleiter: Genau, das ist jetzt das Startobjekt, merke es Dir! Die schwarze Säule zeigt Dir immer zu welchem Objekt Du gehen musst, wenn Du dann richtig stehst verschwindet sie und eine Neue taucht auf.

VP geht jetzt von der Ente zum Schneemann und zum Löwen. Der Spiegel wird automatisch in der Mitte sichtbar.

Versuchsleiter: Der Spiegel ist ein Rückspiegel. Stell Dir also vor, dass der Spiegel, Dein Kopf und das Objekt auf einer Linie liegen müssen.

Versuchsleiter: Wenn Du meinst, dass der Rückspiegel richtig eingestellt ist, bestätige mit der mittleren Maustaste.

Versuchsleiter: Nun siehst Du Feedback, wenn Du damit fertig bist, klicke es mit der mittleren Maustaste weg.

Versuchsleiter: Der Löwe ist Dein neues Startobjekt, merke ihn Dir und laufe wieder von Säule zu Säule.

VP geht vom Löwen zur Büste, zur Ente. Ein Schild mit der Aufschrift „Schau zum Startobjekt“ ist in der rechten unteren Ecke sichtbar.

Versuchsleiter: Nun drehe Dich so, als wenn Du das Startobjekt ansehen würdest und bestätige wieder mit der mittleren Maustaste.

Versuchsleiter: Die Ente ist Dein neues Startobjekt, merke sie Dir und laufe wieder von Säule zu Säule.

VP geht jetzt von der Ente zum Schneemann und zum Löwen. Ein Schild mit der Aufschrift „Laufe zum Startobjekt“ ist in der rechten unteren Ecke sichtbar.

Versuchsleiter: Nun laufe sehr zielstrebig zum Startobjekt und bestätige wieder mit der mittleren Maustaste.

Versuchsleiter: Der Löwe ist Dein neues Startobjekt, merke ihn Dir und laufe wieder von Säule zu Säule.

VP geht vom Löwen zur Büste, zur Ente. Der Spiegel wird in der Mitte sichtbar.

Versuchsleiter: Nun wird alles zusammengefügt, Du zeigst zuerst mit dem Spiegel.

VP zeigt mit dem Spiegel.

Versuchsleiter: Siehst dann das Feedback und klickst es weg.

VP klickt den Spiegel mit Feedback weg.

Versuchsleiter: Dann drehst Du Dich zum Löwen.

VP dreht sich zum Löwen.

Versuchsleiter: Und läufst zum Löwen.

VP läuft zum Löwen. Nach drei Wiederholungen der gesamten Zeigemethode:

Versuchsleiter: So, jetzt bist Du im richtigen Experiment, bitte merke Dir alle Objekte genau. Vergiss nicht, dass Du später eine Karte anfertigen sollst.

B Probleme und Lösungsvorschläge

Die Kommunikation zwischen dem Laptop und dem Tracking Rechner gestaltete sich als schwierig, da ein massiver Datenverlust auftrat. Die W-LAN Kommunikation benutzt als Übertragungsprotokoll das *User Datagram Protocol (UDP)*. Dieses Protokoll ist ein minimales, verbindungsloses Netzwerkprotokoll. Es ist nur für die Adressierung zuständig, ohne die Datenübertragung zu sichern. Dieser nicht zuverlässige Übertragungsdienst ist schnell, kann aber nicht garantieren, dass ein Datenpaket überhaupt ankommt, dass die Datenpakete in der richtigen Reihenfolge ankommen und dass ein Datenpaket nur einmal anstatt mehrmals ankommt. UDP musste benutzt werden, da die Software der Infrarot-Kameras nur dieses Ethernet Protokoll unterstützt.

Als Grundgerüst und zu Testzwecken wurde veralteter Programmcode benutzt. Dieser Programmcode war auf eine LAN Verbindung zwischen dem Überwachungsrechner und einem anderen Rechner ausgelegt. Der Posix Befehl *recvfrom* wurde blockierend benutzt, siehe Programmcode B.1. Es wurde also so lange auf das Datenpaket gewartet bis es da war. Sollte das Datenpaket verloren gegangen sein, so wartete das Programm trotzdem und musste manuell beendet werden. Es konnten keine neuen Positionsinformationen an die virtuelle Umgebung weiter gegeben werden, daher wird immer dasselbe Bild angezeigt. Daher wird um das Posix Kommando *recvfrom* der Posix Befehl *select* eingefügt, siehe Programmcode B.2. Die Kommunikation ist nun nicht mehr blockierend. Wird in einem bestimmten Zeitintervall (420 ms) kein Datenpaket empfangen, so gilt es als verloren. Als Positionsinformation wird die letzte Position erneut verwendet.

Listing B.1: Funktion *recieveUDP*: blockierend

```
int receiveUDP(int sock, void *buffer, int maxlen) {
    int nbytes;
    struct sockaddr name;
    size_t size;
    size = sizeof(name);

    nbytes = recvfrom(sock, buffer, maxlen, 0, &name, &size);
    return nbytes;
}
```

Listing B.2: Funktion receiveUDP: nicht blockierend

```
int receiveUDP(int sock, void *buffer, int maxlen) {
    int nbytes = -1;
    struct sockaddr name;
    size_t size;
    size = sizeof(name);

    fd_set set;
    FD_ZERO( &set );
    FD_SET( sock, &set );

    // seconds and MICROseconds = 10^-6 seconds (42000us = 24Hz)
    struct timeval tout = {0,42000};
    if( TEMP_FAILURE_RETRY (select( FD_SETSIZE, &set, NULL, NULL
        , &tout ) > 0 ))
        nbytes = TEMP_FAILURE_RETRY (recvfrom(sock, buffer, maxlen
            , 0, &name, &size ));

    return nbytes;
}
```

Trotz des nicht blockierenden Empfangs wurde das Bild oft nicht aktualisiert, obwohl die Reflektorkugeln im Raum bewegt wurden. Um diesen Datenverlust zu untersuchen, wurden mehrere Testumgebungen entwickelt. Dabei wurden die Reflektorkugeln bewegt oder blieben unbewegt. Es wurde ein W-LAN und LAN Verbindung benutzt. Es wurde ein anderer Rechner benutzt und es wurden verschiedene Tageszeiten getestet. Es trat immer ein Datenverlust von mehr als 50% auf. Dieser Datenverlust war nicht tragbar, weil sonst die Auswertung nur ungenau gewesen wäre. Aufgrund der verzögerten Bilder bestünde außerdem die Gefahr, dass den Versuchspersonen unwohl wird, oder sie das Gleichgewicht verlieren und eventuell stürzen. Dieser Datenverlust ließ sich aber beheben, indem die Einstellungen des Überwachungsrechners korrigiert wurden. Auch hier wurden alte Einstellungen einer ehemaligen Mitarbeiterin übernommen. Diese arbeitete nur mit 30 Hz, das benutzte Programm ist aber auf 60 Hz eingestellt. Aufgrund dieser Änderung konnte der Datenverlust auf unter 2% reduziert werden. Da nur 420 ms gewartet wird, flackert das Bild nicht. Eine spätere Überprüfung des Datenflusses ergab, dass nie zwei Datenpakete hintereinander verloren gegangen sind.

C Dokumentation der Versuchseinstellungen

Zur Sicherheit der Versuchsperson, um zum Beispiel ein Stolpern zu verhindern, sollten alle vom Laptop oder von der Grafikschnittstelle ausgehenden Kabel mit Klettverschluss am Rucksackgestell befestigt werden. Um einer Beschädigung des Laptop-Displays vorzubeugen, sollte der Laptopdeckel geschlossen oder leicht geöffnet sein. Bei ruckartigen Drehungen der Versuchsperson in Wandnähe, oder beim Bücken der Versuchsperson in Wandnähe sind Kollisionen zwischen dem Laptop und der Wand oder der Versuchsperson und der Wand durch Eingreifen des Versuchsleiters zu vermeiden.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit des Versuchs werden im Folgenden wichtige Einstellungen des Laptops, des Tracking-Rechners sowie der Grafikschnittstelle für das HMD beschrieben.

Laptop

Der **Batterie** des Laptops sollte vollständig geladen sein, um einen Abbruch des Versuchs aufgrund zu geringer Energie zu verhindern. Der Ladezustand kann über *Kontrollzentrum* → *Energiekontrolle* → *Notebook-Akku* abgefragt werden.

Der **Bildschirmschoner**, sowie die automatische **Monitorabschaltung** beim Schließen des Laptopdeckels, sollten deaktiviert werden. Andernfalls ist es möglich, dass die Versuchsperson im Versuch mit dem Bildschirmschoner konfrontiert wird, oder dass die Anzeige schwarz wird und der Versuchsleiter zur Passworteingabe gebeten wird. Die Bildschirmschonereinstellungen finden sich unter *Kontrollzentrum* → *Erscheinungsbild* → *Bildschirmschoner*. Die Monitoreinstellungen finden sich unter *Kontrollzentrum* → *YaST2 Module* → *Sonstiges* → *Power-Management*, dazu werden root-Rechte benötigt.

Die **W-LAN Karte** muss eingesteckt sein und dauerhaft ein orangefarbenes Licht zeigen. Sobald ein Netzkabel eingesteckt wurde, sollte der Laptop ohne das Netzkabel neu gestartet werden. Es traten viele Kommunikationsprobleme auf, da die Kommunikation über die als Standard voreingestellte Adresse der Netzkarte geleitet wird, anstatt über die Adresse der W-LAN Karte, wie es gewünscht ist.

Wichtig für die richtige Darstellung auf dem HMD ist eine **Bildschirmeinstellung** von 1280 x 1024, ansonsten wird der rechte Rand der Versuchsumgebung abgeschnitten. Die Bildschirmeinstellungen kann man unter *Kontrollzentrum* → *Angeschlossene Geräte* → *Anzeige* ändern.

Überwachungsrechner

Um eine Funkkommunikation mit dem Laptop und den infrarot Kameras herzustellen, muss das **Kamera-** und **Funk-Netz** aktiviert sein. Diese Einstellungen kann man unter *Einstellungen* → *Netzwerk- und DFÜ-Verbindungen* prüfen.

Die **Kameras** sind nach dem Start des Überwachungsrechners anzuschalten. Sobald die äußeren vier Kameras eckige Klammern ([]) anzeigen, kann das DTrack Programm gestartet werden. Danach sollten die äußeren vier Kameras eine Zahl anzeigen, welche die Nummer der Kamera angibt. Im Versuch selbst gibt sie die Anzahl der Reflektorkugeln an, die in ihrem Aufnahmebereich liegen. In diesen Versuch gab es fünf Reflektorkugeln. Werden mehr als 5 angezeigt, sollte geprüft werden, ob sich noch andere Kugeln oder z.B. Schuhe, Jacken mit reflektierenden Stoffen im Raum befinden.

Grafikschnittstelle

Bei der Grafikschnittstelle für das HMD ist es sehr wichtig, dass die **Batterien** geladen sind. Der Ladungszustand kann hier leider nicht abgefragt werden. Bei entladenen Batterien ist im HMD nur ein Halbbild zu sehen, außerdem ist das Lüftungssurren der Grafikschnittstelle viel leiser, als bei geladenen Batterien, oder beim Anschließen an das Stromnetz. Wird trotz geladener Batterien nur ein Halbbild angezeigt, so ist ein Neustart der Grafikschnittstelle erforderlich.

D Spezifikation der Hard- und Software

Laptop

Marke Dell Precison M 70

Prozessor intel Pentium M, 1.73 GHz

Grafikkarte nVidia Quadro FX Go 1400

Betriebssystem Suse 9.3

gcc 3.3.5

OpenGL Performer 3.1.1

Netzwerkkarte 10 MBit, 802.11b

Überwachungsrechner

Prozessor AMD 646, 1,4GHz

Betriebssystem Win 2000 SP 4 V 5.0 2195

D-Track

Version 1.22.2

data divisor 1

sync rate 60 Hz

HMD und Grafikschnittstelle

Marke NVIS

Model nVisor SX

FOV 60° diagonal

Pixel 1280 x 1024

Bildfrequenz 60 Hz

E Hilfestellungen zum Versuchsablauf

| Aufgabe | Startobjekt | Zielobjekt |
|---|-------------|------------|
| 1. Laufe zum Startobjekt A | A | C |
| 2. Laufe von A nach B | A | C |
| 3. Laufe von B nach C | A | C |
| 4. Zeige mit den Rückspiegel von C auf A | A | C |
| 5. Schau die Leistungsrückmeldung an | A | C |
| 6. Schau von C nach A | A | C |
| 7. Laufe zurück von C nach A | A | C |
| 8. Laufe zum Startobjekt C | C | E |
| 9. Laufe von C zu D | C | E |
| 10. Laufe von D zu E | C | E |
| 11. Zeige mit den Rückspiegel von E auf C | C | E |
| 12. Schau die Leistungsrückmeldung an | C | E |
| 13. Schau von E nach C | C | E |
| 14. Laufe zurück von E nach C | C | E |
| 15. Laufe zum Startobjekt E | E | B |
| 16. Laufe von E zu A | E | B |
| 17. Laufe von A zu B | E | B |
| 18. Zeige mit den Rückspiegel von B auf E | E | B |
| 19. Schau die Leistungsrückmeldung an | E | B |
| 20. Schau von B nach E | E | B |
| 21. Laufe zurück von B nach E | E | B |
| 22. Laufe zum Startobjekt B | B | D |
| 23. Laufe von B zu C | B | D |
| 24. Laufe von C zu D | B | D |
| 18. Zeige mit den Rückspiegel von D auf B | B | D |
| 25. Schau die Leistungsrückmeldung an | B | D |
| 26. Schau von D auf B | B | D |
| 27. Laufe zurück von D nach B | B | D |
| 28. Laufe zum Startobjekt D | D | A |
| 29. Laufe von D zu E | D | A |
| 30. Laufe von E zu A | D | A |
| 31. Zeige mit den Rückspiegel von A auf D | D | A |
| 32. Schau die Leistungsrückmeldung an | D | A |
| 33. Schau von A auf D | D | A |
| 35. Laufe zurück von A nach D | D | A |
| 36. Beginne wieder bei Schritt 1 | | |

Tabelle E.1: Versuchsablauf

F Perspektivischer Wahrnehmungstest Test

Der perspektivischer Wahrnehmungstest Test (PTA - *perspective taken ability test*) dient dazu die räumliche Orientierung der Versuchspersonen einzuschätzen. Er wurde von der Firma MM Virtual Design LCC entwickelt.

Die Versuchsperson bekam auf einem Monitor ein Bedienungsfeld und ein Aufgabenfeld gezeigt (siehe Abb. F.1). Das Bedienungsfeld besteht aus acht Pfeiltasten: oben, unten, rechts, links und oben links, oben rechts, unten links und unten rechts. Im Aufgabenfeld befinden sich Bilder verschiedener Orte mit entsprechender Bezeichnung in einer räumlichen Konfiguration. Innerhalb dieser Anordnung ist eine stilisierte Figur zu sehen, die in eine bestimmte Richtung sieht. Alle Abbildungen wurden dem Benutzerhandbuch entnommen.

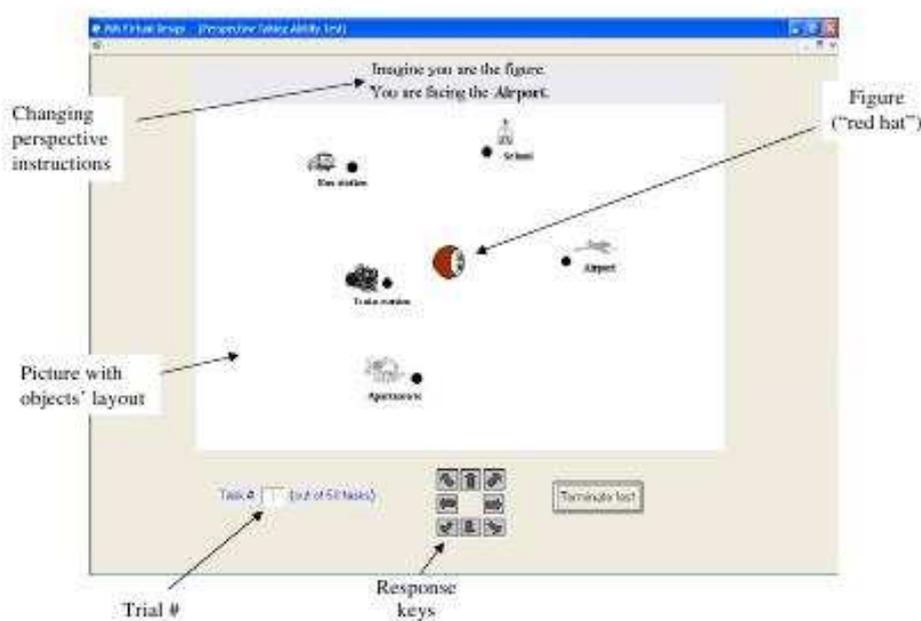
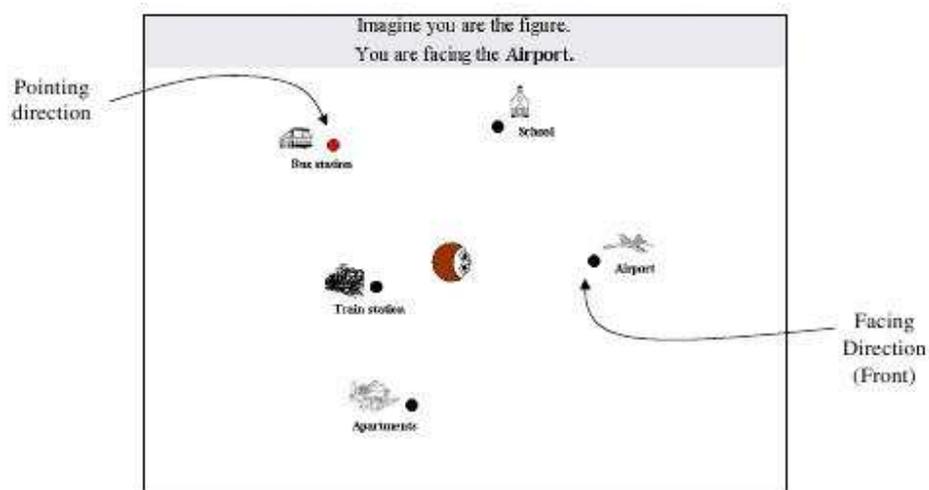


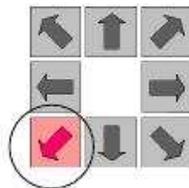
Abbildung F.1: Bedienungs- und Aufgabenfeld des PTA-Tests

Der Test verlief im Einzelnen wie folgt: Die Versuchsperson soll sich zuerst vorstellen, sie sei die Figur und blicke entsprechend ihrer Ausrichtung auf einen der Orte. Nach 3 s fing einer der Orte an zu blinken. Der Proband sollte dann mit Hilfe von Pfeiltasten auf dem Bedienungsfeld angeben, in welcher Richtung sich der blinkende Ort zum stilisierten Kopf befindet. Der stilisierte Kopf im Aufgabenfeld schaut z.B. nach rechts,

der Ort links oben blinkt (siehe Abb. F.2(a)). Dann ist der Ort von der Versuchsperson aus links oben, aber vom stilisierten Kopf aus links hinten. Die Versuchsperson muss berücksichtigen, dass die Pfeiltaste, die auf dem Monitor nach oben zeigt, der Blickrichtung der Figur entspricht. Sie muss also hier die Pfeiltaste ↙ wählen (siehe Abb. F.2(b)).



(a) Aufgabe im PTA-Test



(b) Lösung im PTA-Test

Abbildung F.2: Beispieldurchgang des PTA-Tests

Der Test beinhaltet 58 dieser Aufgaben und dauert etwa 10 Minuten. Am Ende wird ein Wert s ausgegeben, der sich aus der Reaktionszeit und den Fehlern der Versuchsperson gemäß folgender Formel zusammensetzt:

$$s = \frac{100}{RZ + 2} \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta\alpha}{22,5}\right)^2\right)$$

RZ ist hier die Reaktionszeit der Versuchsperson und $\Delta\alpha$ ist die Differenz zwischen dem richtigen Winkel und dem, von der Versuchsperson, gezeigten Winkel in Grad.

Ab einem Wert von 20 wird der Versuchsperson eine gute Orientierungsleistung zugeschrieben. Der PTA Wert aller Versuchspersonen in diesem Experiment ist $14 < s < 40$ und beträgt im Durchschnitt $m = 25$. Nach dem Ausschluss mehrerer Versuchspersonen ist der PTA Wert $18 < s < 34$. Der Mittelwert erhöht sich auf $m = 26,8$ mit einer Varianz von $v = 5$.

Literaturverzeichnis

- [Benhamou, Séguinot 1995] BENHAMOU, Simon ; SÉGUINOT, Valérie: How to Find one's way in the Labyrinth of Path Integration Models. In: *Journal of Theoretical Biology* 174 (1995), June, Nr. 4, S. 463–466
- [Bennett 1996] BENNETT, Andrew T.: Do animals have cognitive maps? In: *J Exp Biol* 199 (1996), Nr. 1, S. 219–224
- [Foo et al. 2005] FOO, Patrick ; WARREN, William H. ; DUCHON, Andrew ; TARR, Michael J.: Do Humans Integrate Routes Into a Cognitive Map? Map- Versus Landmark-Based Navigation of Novel Shortcuts. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 31 (2005), Nr. 2, S. 195–215
- [Gallistel 1990] GALLISTEL, C. R.: *The Organisation of Learning*. The MIT Press, 1990
- [Ishikawa, Montello 2006] ISHIKAWA, T. ; MONTELLO, D.: Spatial Knowledge Acquisition from Direct Experience in the Environment: Individual Differences in the Development of Metric Knowledge and the Integration of Separately Learned Places. In: *Cognitive Psychology* 52 (2006), S. 93–129
- [Kearns et al. 2002] KEARNS, Melissa J. ; WARREN, William H. ; DUCHON, Andrew P. ; TARR, Michael J.: Path integration from optic flow and body senses in a homing task. In: *Perception* 31 (2002), S. 349–374
- [Kim 2005] KIM, Gerard J.: *Designing Virtual Reality Systems: The Structured Approach*. Secaucus, NJ, USA : Springer-Verlag New York, Inc., 2005. – ISBN 1852339586
- [Klatzky et al. 1998] KLATZKY, Roberta L. ; LOOMIS, Jack M. ; BEALL, Andrew C. ; CHANCE, Sarah S. ; GOLLEDGE, Reginald G.: Spatial updating of self-position and orientation during real, imagined, and virtual locomotion. In: *Psychological Science* 9 (1998), S. 293–298
- [Kozhevnikov et al. 2006] KOZHEVNIKOV, M. ; MOTES, A. M. ; RASCH, B. ; BLAJENKOVA, O.: Perspective-taking vs. mental rotation transformations and how they predict spatial navigation performance. In: *Applied Cognitive Psychology* 20 (2006), Nr. 3, S. 397–417
- [Mallot, Gillner 2000] MALLOT, H.A. ; GILLNER, S.: Route navigation without place recognition: what is recognized in recognition-triggered response? In: *Perception* 29 (2000), S. 43–55
- [Mallot 2005] MALLOT, Hanspeter A.: *Vorlesungsskript zu Kognitive Neurobiologie im WS 05/06*. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, 2005

- [May 2000] MAY, Mark: *Kognition im Umraum*. Wiebaden : DUV Kognitionswissenschaft, 2000 (Studien zur Kognitionswissenschaft)
- [Meilinger et al. 2007] MEILINGER, T. ; RIECKE, B. E. ; BERGER, D. ; BÜLTHOFF, H. H.: A novel immersive virtual environment setup for behavioural experiments in humans, tested on spatial memory for environmental spaces. 2007 (158). – Forschungsbericht
- [Mou et al. 2004] MOU, W. ; MCNAMARA, T. P. ; VALIQUETTE, C. M. ; RUMP, B.: Allocentric and egocentric updating of spatial memories. In: *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition* 30 (2004), January, Nr. 1, S. 142–157
- [O’Keefe, Nadel 1978] O’KEEFE, John ; NADEL, Lynn: *The Hippocampus as a Cognitive Map*. Oxford University Press, USA, 1978
- [Riecke 2003] RIECKE, Bernhard E.: *How far can we get with just visual information? Path integration an spatial updating studies in Virtual Reality*, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Diss., 2003
- [Riecke et al. 2002] RIECKE, Bernhard E. ; VEEN, Henricus A. H. C. ; BÜLTHOFF, Heinrich H.: Visual homing is possible without landmarks: a path integration study in virtual reality. In: *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 11 (2002), Nr. 5, S. 443–473
- [Rolls et al. 1998] ROLLS, Edmund T. ; TREVES, Alessandro ; ROBERTSON, Robert G. ; GEORGES-FRANÇOIS, Pierre ; PANZERI, Stefano: Information About Spatial View in an Ensemble of Primate Hippocampal Cells. In: *Neurophysiology* 79 (1998), S. 1797–1813
- [Schoch 2009] SCHOCH, Dagmar: *Strategien und Methoden der menschlichen Navigation in virtuellen Räumen*, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Diss., 2009
- [Sholl 2001] SHOLL, M. J.: The Role of a Self-Reference System in Spatial Navigation. In: *COSIT 2001: Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory*. London, UK : Springer-Verlag, 2001. – ISBN 3–540–42613–2, S. 217–232
- [Wang, Spelke 2002] WANG, Ranxiao F. ; SPELKE, Elizabeth S.: Human spatial representation: insight from animals. In: *TRENDS in Cognitive Sciences* 6 (2002), Nr. 9, S. 376–382