Schätzen von Richtungen
in realen und virtuellen Umgebungen

Diplomarbeit
der Fakultät für Biologie der Universität Tübingen

vorgelegt von:

Kirsten Sellen

Tübingen, November 1998

Erklärung:

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit selbst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Tübingen, den 26. November 1998

Danksagung

Für die Gelegenheit zur Durchführung dieser Diplomarbeit, deren Betreuung und Begutachtung möchte ich Prof. H.-U. Schnitzler und Prof. H. H. Bülthoff herzlich danken. Dr. H. A. H. C. van Veen möchte ich für die tägliche Betreuung, anregende Diskussionen und seine Geduld danken. Allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe, insbesondere des "VE-Labs" möchte ich für die Hilfe bei den diversen größeren und kleineren Problemen danken. Mein besonderer Dank gilt dabei Dipl. Phys. Sibylle Steck, die mir vor allem zu Beginn der Diplomarbeit vielfältige Hilfestellung und außerdem meine erste Einführung in die Programmiersprache C gegeben hat und mir auch bei allen weiteren "Stufen" der Programmierung eine große Hilfe war. Bei meinen Freunden möchte ich mich für die moralische Unterstützung während dieser Zeit bedanken.

Inhaltsübersicht

1. ZUSAMMENFASSUNG **1**

2. EINFÜHRUNG: ANSÄTZE UND ERGEBNISSE DER NAVIGATIONSFORSCHUNG **3**

2.1 Einführung **3**

2.2 Aspekte der Navigationsforschung **4**

2.3 Informationsquellen **6**

2.4 Rolle von angeborenem Verhalten und Lernen **9**

2.5 Typen von Ortsrepräsentationen **10**
2.5.1 Heimvektor 11
2.5.2 Assoziation von Landmarken mit Bewegungsentscheidungen oder Richtungsvektoren 11
2.5.3 Routenwissen 11
2.5.4 Topologische Karte 12
2.5.5 Metrische Karte 12

2.6 Modelle für Ortsrepräsentationen **12**
2.6.1 Überblick über Modelle für Ortsrepräsentation 12
2.6.2 Ist die räumliche Repräsentation des Menschen metrisch? 16

2.7 Neuronale Substrate **17**

2.8 Versuchsparadigmen **19**
2.8.1 Paradigmen für Versuche unter Laborbedingungen und in der realen Welt 20
2.8.2 Virtuelle Umgebungen 21
2.8.3 Vergleichbarkeit von realer Welt und virtuellen Umgebungen 24

3. ZIELSETZUNG DER DIPLOMARBEIT **26**

3.1 Untersuchung der räumlichen Repräsentation **26**

3.2 Zeigen von Richtungen als Paradigma **27**

3.3 Vergleiche zwischen realer und virtueller Umgebung **27**

4. MATERIALIEN UND METHODEN **29**

4.1 Versuchspersonen **29**

4.2 Versuche in der realen Welt **29**
4.2.1 Materialien 29
4.2.2 Versuchsdurchführung in der realen Welt (Tübinger Innenstadt) 31
4.2.3 Fragebogen 32

4.3 Versuche in der virtuellen Umgebung **32**
4.3.1 Kurzfassung 32
4.3.2 Simulationsumgebung 33
4.3.3 Versuchsdurchführung in der virtuellen Umgebung 35

4.4 Auswertung **36**

5. ERGEBNISSE UND DISKUSSIONEN **37**

5.1 Einführung **37**

5.2 Zeigen von Richtungen in der realen Umwelt **37**
5.2.1 Einführung 37
5.2.2 Ergebnisse 38
Verteilung der Richtungsfehler 38
Systematische Verzerrungen 39
Konstanz über die Zeit 45
Eingesetzte Strategie 46
Übrige Analysen 47
5.2.3 Diskussion 48

5.3 Zeigen von Richtungen in einer virtuellen Umgebung **53**
5.3.1 Einführung 53
5.3.2 Ergebnisse 53
Verteilung der Richtungsfehler 53
Systematische Verzerrungen 54
Eingesetzte Strategie 56
Übrige Analysen 56
5.3.3 Diskussion 58

5.4 Vergleich von realer und virtueller Umgebung **59**
5.4.1 Einführung 59
5.4.2 Ergebnisse 60
Verteilung der Richtungsfehler 60
Systematische Verzerrungen 60
Konstanz der Richtungsschätzungen in den beiden Umgebungen 62
Übrige Analysen 64
5.4.3 Diskussion 64

6. ALLGEMEINE DISKUSSION UND AUSBLICK **70**
6.1 Mentale Repräsentation der Umgebung 70
6.2 Vergleich zwischen realer und virtueller Umgebung 72

ANHANG **74**

A. Versuchsanleitung **74**

B. Lokationen **75**
B.1 Startpunkte in der realen und der virtuellen Umgebung 75
B.2 Karten der Meßorte 75
B.3 Panoramabilder 78

C. Fragebogen **80**

D. Detaillierte Auflistung der Ergebnisse **82**
D.1 Richtungsschätzungen der einzelnen Versuchspersonen in der realen und der virtuellen Umgebung 82
D.2 "Von"- und "Zu"-Fehler der einzelnen Versuchspersonen in der realen und der virtuellen Umgebung 86

LITERATURVERZEICHNIS **90**

1. Zusammenfassung

Im täglichen Umgang mit der Umwelt lernen wir deren räumliche Struktur kennen. Das erworbene räumliche Wissen hilft uns bei der Durchführung und Planung von Handlungen in dieser Umgebung. In dieser Arbeit sollen Eigenschaften dieses räumlichen Gedächtnisses untersucht werden. Ein solches räumliches Gedächtnis wird häufig auch als räumliche Repräsentation bezeichnet. Dieser Begriff wird von verschiedenen Autoren allerdings mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt. In dieser Arbeit wird unter räumlicher Repräsentation ein Gedächtnis über räumliche Beziehungen in der einer Umgebung verstanden. Es wurde untersucht, wie genau erworbenes metrisches Wissen einer Umgebung ist und welche Art von Abweichungen von der tatsächlichen Metrik bestehen. Eine zweite Frage war, wie konsistent Schätzungen in der realen Welt und einer virtuellen Version derselben Umgebung sind. Virtuelle Umgebungen sind sehr gut geeignet, Verhalten und komplexe Wahrnehmungen des Menschen unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Es ist jedoch bisher nicht geklärt, ob in virtuellen Umgebungen erhaltene Ergebnisse direkt auf die reale Welt übertragbar sind. Der hier durchgeführte Vergleich zwischen einer realen und einer virtuellen Umgebung ist ein erster Ansatz zur Beantwortung dieser Frage.

Als Methode wurde dabei das Schätzen von Richtungen verwendet. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, von verschiedenen Standorten aus die Richtung zu anderen Orten zu schätzen. Dies wurde sowohl in der realen Umgebung - der Tübinger Innenstadt - als auch einer virtuellen Version derselben Umgebung durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Schätzung waren die Orte, deren Richtung geschätzt werden sollte, vom jeweiligen Standort aus nicht sichtbar. Daher mußten die Versuchspersonen für die Schätzungen auf ihre Repräsentation der Umgebung zurückzugreifen, die sie im Laufe von mehreren Jahren Wohndauer in Tübingen erworben hatten.

Es zeigt sich in beiden Umgebungen eine hohe metrische Genauigkeit der Schätzungen. Im Mittel verschätzten sich die Versuchspersonen in der realen Umgebung um einen Betrag von $11.0 \pm 0.3°$ und um $12.9 \pm 0.4°$ in der virtuellen Umgebung. Eine so hohe Genauigkeit läßt sich nur durch metrisches Wissen über die Innenstadt erklären. Das Wissen kann von den Versuchspersonen fast ohne Verlust an Genauigkeit auch in der virtuellen Version derselben Umgebung angewendet werden. In den Schätzungen zeigen sich allerdings an einigen Orten ausgeprägte systematische Fehler. Die Verteilung der systematischen Fehler kann durch lokale Verzerrungen einer metrischen Repräsentation erklärt werden. Bei diesen lokalen Verzerrungen könnte es sich um Dislokationen, d.h. eine Fehleinschätzung der Lage des Ortes relativ zu anderen Orten, oder um Misorientierungen handeln, d.h. eine falsche Einschätzung der Orientierung eines Ortes im Verhältnis zu der Umgebung. Allerdings kommen auch andere Erklärungsmöglichkeiten für die beobachteten Fehler in Frage. So wäre auch ein Einfluß der Anzahl der Abbiegungen zwischen den beiden Orten und dem Betrag des Richtungsfehlers denkbar. Auch die Richtung, in der der Weg zum gefragten Ort aus dem Blickfeld verschwindet, könnte sowohl auf die Größe als auch das Vorzeichen des Fehlers einen Einfluß haben.

In Bezug auf den Vergleich zwischen realer und virtueller Umgebung ist festzustellen, daß die Fehler in der virtuellen Umgebung zwar signifikant größer sind, der Betrag dieses Unterschieds aber nicht groß ist. Das Muster der systematischen Fehler ist in beiden Umgebung nahezu identisch. Die Versuchspersonen können also das in der realen Umgebung erworbene Wissen auch in der virtuellen Umgebung anwenden.

2. Einführung: Ansätze und Ergebnisse der Navigationsforschung

2.1 Einführung

Eine Eigenschaft der meisten Tiere ist, daß sie sich frei in ihrer Umwelt fortbewegen können. Für viele Tiere gibt es dabei in ihrer Umwelt eine Reihe von Orten, die sie zielstrebig aufsuchen. Dabei zeigen sie uns teilweise normal, teilweise höchst erstaunlich erscheinende Leistungen. So kehren Bienen in ihren Stock, Füchse in ihren Bau zurück; Futterstellen werden mehrmals aufgesucht. Viele Vögel machen Langstreckenwanderungen zwischen Winter- und Sommerquartieren, auch einige Fisch- und Walarten unternehmen regelmäßige Wanderungen über große Distanzen. Im Laufe der Evolution müssen Strategien, Mechanismen und Repräsentationen entwickelt worden sein, die solches Verhalten ermöglichen. Für viele der gezeigten Verhaltensweisen ist eine gute Kenntnis der Umgebung eine wichtige Voraussetzung. Eine solche Kenntnis der Umgebung dürfte insbesondere bei Tieren mit Revieren oder Territorien eine große Rolle spielen. Dabei stellt sich die Frage, wie und was ein Lebewesen über seine Umwelt lernt. Unter Navigation soll hier die Fähigkeit von Lebewesen verstanden werden, sich in der Umgebung zurechtzufinden, d.h. die Fähigkeit, sich zu orientieren, Wege in der Umwelt zu gehen und zu planen. Navigationsforschung befaßt sich dabei mit dem Verhalten selbst, aber auch mit den Grundlagen, die dieses Verhalten ermöglichen, wie Informationsquellen und Repräsentationen.

Eine uns selbstverständlich erscheinende Voraussetzung für Navigationsverhalten ist die Gliederung der vierdimensionalen Welt in einen dreidimensionalen Raum und eine zeitliche Dimension; d.h. die erlebte Abfolge von sensorischen Ereignissen wie Ansichten und Bewegungen wird in Zeit und Raum gegliedert. Bestimmte Explorationsmuster können diese Trennung in Zeit und Raum unterstützen (Poucet, 1993). Navigation beinhaltet immer eine Interaktion mit der Umwelt. Es steht dabei - wie auch andere Verhaltensweisen - in einem Wahrnehmungs-Handlungs-Kreislauf, d.h. Wahrnehmung der Umwelt, mentale Repräsentation und gezeigtes Verhalten bilden Elemente eines Kreislaufs, die sich gegenseitig beeinflussen und selbst wiederum von den speziellen Umweltbedingungen abhängig sind.

Da diese wechselseitige Beeinflussung alle Aspekte der Navigation berührt, soll in diesem Kapitel zunächst ein Überblick über Erkenntnisse aus verschiedenen Bereichen der Navigati-

onsforschung gegeben werden, auch wenn im Rahmen dieser Arbeit nur der Aspekt der Repräsentation behandelt wird. Damit sollen die Faktoren, die die hier bearbeitete Fragestellung beeinflussen, verdeutlicht werden. Im dritten Kapitel soll dann auf den Bereich der Forschung, der für das Diplomthema direkt relevant ist, genauer eingegangen werden.
Im nächsten Abschnitt sollen zunächst die Breite der zu Navigationsfragen gehörenden Gebiete und der mit ihnen beschäftigten wissenschaftlichen Disziplinen dargestellt werden, bevor in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels auf die Forschungsergebnisse und Konzepte zu Informationsquellen, Lernen, Ortsrepräsentationen, daraus entwickelten Modellen und deren neuronale Substrate genauer eingegangen werden soll.

2.2 Aspekte der Navigationsforschung

Je nach Lebensweise und Umwelt stellen sich unterschiedliche Anforderungen an das Navigationssystem, das artspezifische Verhaltensweisen in dieser Umwelt ausführbar machen soll. Um diesen unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden, sind über das ganze Tierreich eine Vielzahl von sensorischen Mechanismen zur Selektion wichtiger Information, von Strategien, Verhaltensweisen und neuronalen Repräsentationen entwickelt und in den Dienst der Navigation gestellt worden. Zwischen in der Umwelt vorhandenen und letztendlich verwerteten Informationen, Verhaltensleistungen und Repräsentationen bestehen vielfältige Abhängigkeiten. Bestimmte Informationsquellen sind geeignet, eine Reihe, aber nicht unbedingt alle Arten von Verhalten zu gewährleisten. Mit Informationsquellen sollen hier bestimmte funktionelle Typen an Information, die aus den generell in Umwelt vorhandenen Informationen herausgefiltert werden, gemeint sein. Wichtige Informationsquellen für die Navigation sind z.B. globale Kompasse, Landmarken, Wegintegration oder Bewegungsentscheidungen. Dabei bedingt die Informationsquelle aber nicht direkt eine bestimmte Verhaltensweise. Vielmehr ist das Zusammenspiel meist mehrerer Informationsquellen und der Repräsentation wichtig. Solche grundlegenden Verhaltensleistungen sind die Wiederholung früherer Pfade, Finden eines Heimwegs, Finden eines bekannten Ziels von neuen Startpositionen aus oder das Finden von Abkürzungen. Auch in bezug auf neuronale Repräsentation sind mehrere grundlegende Möglichkeiten denkbar: Assoziationen von Ansichten mit Bewegungsentscheidungen, Routengedächtnis, Heimvektoren, topologische oder topographische Karten. Die Strategien und Repräsentationen können unterschiedlich komplex sein. Auf die genauen Eigenschaften der verschiedenen Informationsquellen, Verhaltensweisen und Repräsentationen und ihr Zusammenwirken soll in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels genauer eingegangen werden.
Da die mentale Repräsentation der Umgebung zweckgebunden erworben wird, ist anzunehmen, daß sie außer reiner räumlicher Information auch Bedeutungs- und Bewertungsinhalte umfaßt (z.B. gute Futterstelle, gefährlicher Weg), die dazu benutzt werden können, das Verhalten zu optimieren. So könnte die Benutzung einer mentalen Karte einem Organismus wie dem Menschen dabei helfen, nicht nur einen möglichst kurzen, sondern auch einen möglichst sicheren Weg zu einem bestimmten Ziel zu finden oder umgekehrt ein bestimmtes Ziel unter Berücksichtigung von Kosten-Nutzen-Verhältnissen auszuwählen.

Ein Beispiel für eine Navigationsleistung, bei der viele der eben beschriebenen Aspekte untersucht wurden, ist die Nahrungssuche bei Bienen. Durch Markierung von einzelnen Bienen konnte gezeigt werden, daß diese immer wieder an einen bestimmten Futterplatz zurückkehren. Dabei legen sie zum Teil beachtliche Distanzen zurück; die Futterquellen sind meist we-

niger als 2 km entfernt, teilweise wurden aber auch wesentlich größere Distanzen registriert (in Wehner, 1992: bis zu zehn Kilometer).
Es sind eine ganze Reihe von Informationsquellen charakterisiert worden, die von Bienen zur Navigation eingesetzt werden. Sie besitzen einen Sonnenkompaß und einen Polarisationskompaß, den sie zur Bestimmung einer Referenzrichtung gegenüber den eigenen rotatorischen Bewegungen einsetzen. Anatomische Untersuchungen konnten klären, wie das Insektenauge polarisiertes Licht wahrnimmt. Auf Retina-Ebene wird dabei ein sensorischer Filter gebildet, der an die mittlere natürliche Verteilung der Polarisationsvektoren am Himmel relativ zum solaren Meridian angepaßt ist (Zusammenfassung in Wehner, 1992). Eine weitere Informationsquelle sind Landmarken. Durch Manipulationen an Landmarken wurde untersucht, welche ihrer Merkmale für die Navigation wichtig sind. So ist die Winkelgröße der Objekte auf der Retina wichtig, um den genauen Ort einer Futterquelle wiederzufinden (Cartwright und Collett, 1983). Außerdem zeigte sich auch, daß Landmarken für verschiedene Navigationsstrategien genutzt werden können (Collett, 1996). Unter bestimmten Umständen kann von Bienen auch Wegintegration zur Navigation genutzt werden (Maurer und Séguinot, 1995; Menzel et al., 1996). Bienen haben auch die außergewöhnliche Fähigkeit, Information über ertragreiche Futterquellen an andere Arbeiterinnen des Stockes zu übermitteln. Dabei werden Angaben über Richtung, Entfernung und Ergiebigkeit durch den Schwänzeltanz in kodierter Form weitergegeben. Für die Angabe der Richtung spielt dabei vor allem der Sonnenkompaß eine große Rolle.
Ein weiteres Feld, das zum Verständnis der Navigationsleistungen beiträgt, betrifft die Frage, wie optische Flußfelder zur Steuerung des Fluges verwendet werden. Hierzu wurden elektrophysiologische Untersuchungen bei Fliegen gemacht (Krapp und Hengstenberg, 1996). Durch Ableitungen von Neuronen konnten Arten von Flußfeldern ermittelt werden, die für das Verhalten des Insekts wichtig sind. Dazu gehören z.B. kohärente Großfeldrotationen, die Information über Rotation des Insekts liefern. Untersuchungen, wie Landmarken neuronal festgehalten werden, gibt es bisher nicht. Es sind aber Modelle über die Art, wie sie zur Navigation eingesetzt werden, aufgestellt worden. Diese bestätigten sich auch durch Computersimulationen (Cartwright und Collett, 1987).

Bei der Vielzahl von Organismen, für die Navigation eine Rolle spielt, und den zahlreichen Facetten dieses Phänomens ist es nicht erstaunlich, daß sich eine Reihe verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen mit Navigation bzw. räumlichen Repräsentationen beschäftigt. Dabei wird die Navigationsforschung von den verschiedenen Disziplinen mit unterschiedlichen Schwerpunkten, Methoden und Vorannahmen betrieben.
In der Biologie werden vor allem das Verhalten, die Strategien und Fähigkeiten verschiedener Tiere untersucht. Das beobachtete Verhalten wird dabei durch möglichst einfache Modelle in bezug auf Anforderungen an Gedächtniskapazität und "Berechnung" zu erklären versucht. Die Repräsentation sollte möglichst effektiv sein, d.h. sie sollte geringe Anforderungen an neuronale Kapazität stellen, aber (im evolutionsbiologischen Sinn) erfolgreiches Verhalten ermöglichen. Je nach Lebensweise, Umwelt und auch Lebensdauer kann erfolgreiches Verhalten unterschiedlich komplex sein und mehr oder weniger neuronale Kapazität beanspruchen. Die effektivste Repräsentation wäre dann diejenige, deren Kosten-Nutzen-Verhältnis unter den speziellen Lebensumständen am günstigsten ist.
Die Psychologie interessiert sich vor allem für die Art der Repräsentation des Menschen und deren Entwicklung im Laufe des besseren Kennenlernens einer Umgebung sowie beim Heranwachsen vom Kind zum Erwachsenen. Untersucht wird dies vor allem durch das Schätzen von Distanzen und Richtungen, Zeichnen von Karten der Umgebung, seltener durch direkte Messung der Verhaltensleistungen. Sowohl Biologen als auch Psychologen sind daran inter-

essiert, welcher Teil der in der Umwelt vorhandenen Information tatsächlich für die Navigation benutzt wird. Mit der Entwicklung der Neurobiologie wurden aufgrund der Ergebnisse aus elektrophysiologischen Messungen im Gehirn und auch aufgrund von neurologischen Störungen Repräsentations-Modelle, die eine neuronale Grundlage haben, vorgeschlagen.
Auch in der Robotik, Informatik sowie der Mathematik finden sich Beiträge zur Navigationsforschung. Sie sind in vielen Fällen eher theoretischer Natur, liefern aber gerade dadurch grundlegende Aussagen, die auch für die anderen Disziplinen interessante neue Ansätze für deren Forschung oder Lösungen für unerklärte Phänomene liefern können. In anderen Fällen können Modelle, die z.B. in der Biologie oder Psychologie aufgestellt wurden, durch Implementation in Robotern oder Computersimulation widerlegt oder unterstützt werden. Andererseits kann die Biologie der Robotik bei Lösung von Problemen helfen. So ist für Roboter Navigation eine schwierige und komplexe Aufgabe. Von Tieren wird diese Aufgabe dagegen in der Regel ohne Probleme gemeistert - die Robotik könnte sich (und hat dies auch) Ideen aus biologischen Systemen zur Lösung ihrer Probleme holen.
Linguistik und Geographie beschäftigen sich ebenfalls mit Raumkognition. Dabei geht es in der Linguistik vor allem um die sprachliche Wiedergabe von räumlichen Beziehungen, in der Geographie um geeignete Strukturierungen und graphische Darstellungsformen örtlicher Information.

2.3 Informationsquellen

Navigation findet in Interaktion mit der Umwelt statt. Dabei stellt sich die Frage, welche Informationen ein Lebewesen aus der Umwelt verwertet, um seine Navigationsaufgaben zu meistern. Es ist eine Vielfalt von Sinnessystemen bekannt, die im Dienste der Navigation stehen. Dabei können verschiedene Sinnesmodalitäten unter Umständen funktionell ähnliche Informationen liefern. In diesem Abschnitt sollen zunächst die wichtigsten Informationsquellen charakterisiert werden. Danach soll beschrieben werden, von welchen Sinnesmodalitäten diese Informationsquellen geliefert werden können. Es sollte auch betont werden, daß in der natürlichen Situation meist verschiedene sensorische Systeme zusammenwirken. Die unterschiedlichen Beiträge und Interaktionen der Sinnesmodalitäten und Informationsquellen sind dabei bisher aber kaum systematisch erforscht worden.

Es gibt eine Vielzahl von teilweise sehr speziellen Informationsquellen (siehe z.B. Varju, 1998), die von Tieren für die Navigation benutzt werden. Hier sollen nur solche beschrieben werden, die im ganzen Tierreich offenbar eine weite Verbreitung haben. Dazu gehören Landmarken, Kompasse, Bewegungsentscheidungen und Wegintegration (Übersicht in Tab. 1).
Landmarken sind distinkte, auffällige Reize oder Orte in der Umwelt, die als Referenzpunkte in Großfeldumgebungen dienen. Mit Großfeldumgebungen sind Umgebungen gemeint, die nicht von einem Punkt aus einsehbar sind. Landmarken können auf verschiedene Weisen bei der Navigation helfen. So können sie beim Wiedererkennen von Orten und somit bei der Positionsbestimmung helfen. Andererseits können Landmarken, die in der Nähe oder in gerader Linie zum Ziel liegen, auch als Hilfsziele (beacons) direkt angesteuert werden (Collett, 1996). Eine andere Unterteilungsweise ist die Unterscheidung zwischen lokalen und globalen Landmarken. *Lokale Landmarken* sind strategische Punkte, die an Anfangs- oder Endpunkten von Wegen liegen oder an denen diese vorbeiführen (Siegel und White, 1975). An ihnen können Bewegungsentscheidungen (Richtungsänderungen) festgemacht werden. Auf diese Weise kann Routenwissen aufgebaut werden. *Globale Landmarken* dagegen zeichnen sich dadurch

aus, das sie weithin sichtbar sind, also meist weiter vom Weg entfernt sind. Sie haben eine kompaßähnliche Funktion. Durch sie können Richtungen im Sinne eines allozentrischen Bezugsrahmens festgelegt werden.
Eine weitere wichtige Klasse von Informationsquellen sind ***Kompasse***. Sie geben global geltende Richtungsinformation. Zusammen mit Distanz- oder Zeitmessern können sie das Ansteuern von bestimmten Orten ermöglichen. Kompasse spielen eine wichtige Rolle für Tierarten, die Langstreckenwanderungen durchführen und dabei eine bestimmte Richtung einhalten müssen.
Eine andere Informationsquelle sind ***Bewegungsentscheidungen***. Durch deren Erinnern kann ein Weg wiederholt werden. Durch ***Wegintegration*** können zurückgelegte Strecken und die Richtung und Distanz zu einem Ausgangspunkt gemessen werden. Dazu werden Informationen über die Eigenbewegung integriert. Durch inhärente Meßungenauigkeit der Sensoren akkumulieren sich über die Zeit Fehler in der Berechnung der eigenen Position. Andere Informationsquellen wie Landmarken können helfen, das System zu rejustieren.

Die am besten untersuchte informationsliefernde Sinnesmodalität ist der ***visuelle*** Sinn. Er kann verschiedene Arten von Informationen liefern. Eine wichtige visuelle Informationsquelle sind Landmarken. Optische Landmarken sind meist in Größe oder Farbe auffällige Objekte. Sie können auch aufgrund einer besonderen persönlichen Bedeutung ausgewählt werden. Ihre Position spielt ebenfalls eine wichtige Rolle: Vor allem Objekte an Entscheidungspunkten dienen als (lokale) Landmarken (Cohen und Schuepfer, 1980; Aginsky, 1996). Optischer Fluß kann zur Distanzschätzung und Messung von Richtungsänderungen verwendet werden. Diese Information kann zur Wegintegration, zur Wiederholung von Bewegungsentscheidungen oder im Rahmen einer metrischen Karte eingesetzt werden. Ein Sonnenkompaß und Polarisationskompaß sind z.B. für Bienen nachgewiesen; er kann der globalen Orientierung bzw. als Referenzrichtung dienen. Für einige Vogelarten ist ein Sternenkompaß nachgewiesen, der zur Bestimmung der Nordrichtung eingesetzt wird (Waterman, 1990).

Die Wahrnehmung von Eigenbewegungen durch ***propriozeptive*** Sensoren kann zur Distanzschätzung genutzt werden. Dies kann z.B. durch Doppelintegration der vestibulären Beschleunigungsinformation oder wie bei Spinnen der Gattung *Cupiennius* durch das Zählen von Schritten (Wehner, 1992, S. 85f) geschehen. Außerdem können Richtungsänderungen festgestellt werden. Beide Punkte können gemeinsam zur Wegintegration, zum Aufbau einer metrischen Karte oder auch zur Ausbildung von festen motorischen Programmen dienen.

Die Rolle ***auditorischer*** Information ist nur teilweise erforscht. Ähnlich wie bei visueller Information können Geräuschquellen in der Umwelt als auditorische lokale und globale Landmarken dienen. Diese sind allerdings nicht so informativ wie visuelle Landmarken, da sie in der Regel reine Positions-, aber keine Orientierungsinformation liefern. Eine besondere Rolle spielt dagegen das Gehör bei Fledermäusen (Schnitzler und Henson, 1980) und Delphinen. Durch Reflexion von selbst produzierten Ultraschallauten an Objekten in der Umgebung erhalten sie ein genaues Bild der Umwelt; das Gehör spielt hier eine ähnliche Rolle wie der visuelle Sinn beim Menschen. Auch das akustische Flußfeld der Echos könnte eine Rolle spielen (Müller und Schnitzler, 1998).

Taktile Reize werden über Hautsensoren wahrgenommen. Die Sensoren liegen teilweise in spezialisierten Sinnesorganen wie Antennen bei Krebsen oder Schnurrbarthaare bei verschiedenen Säugerarten wie Ratten oder Katzen. Der Flußkrebs *Cherax destructor* kann anscheinend eine taktile Karte von der Lage, Größe und Form von Objekten in seiner Umgebung

aufbauen (Wehner, 1992, S. 64). Insgesamt ist aber über die Rolle von taktiler Information wenig bekannt.

Bei der Wahrnehmung über ***chemische Sinne*** wie den Geruchssinn sind auch Analoga zu Landmarken denkbar. Für viele Tierarten mit einem guten Geruchssinn wie z.B. Hunde könnte dies eine Rolle spielen. Ameisen legen selbst Duftspuren aus - unterschiedliche Pheromone haben dabei unterschiedliche Funktion. Sie können damit zu verschiedenen Zwecken "Spuren" legen, z.B. zur eigenen Orientierung oder zur Rekrutierung von anderen Arbeiterinnen zu einer guten Futterquelle (Wehner, 1992, S. 115 ff). Über die Bedeutung dieses Sinns für die Navigation allgemein ist letzten Endes aber ebenfalls wenig bekannt.

Eine Reihe von wasserlebenden Tierarten, vor allem Fische, besitzen auch einen ***elektrischen Sinn***. Dieser wird von verschiedenen Tierarten unterschiedlich genutzt. Einerseits können Elektrorezeptoren dazu benutzt werden, um externe elektrische Felder wahrzunehmen. Externe Spannungsdifferenzen, wie sie z.B. durch Bewegung des Tieres selbst oder Meeresströmungen im Magnetfeld der Erde entstehen, können als Kompaß benutzt werden. Andererseits können selbsterzeugte, schwachelektrische Feldern zur Elektroortung eingesetzt werden. Durch Detektion von Änderungen im eigenerzeugten Feld werden Objekte in der Umgebung ausgemacht (Zusammenfassung in Waterman, Kapitel 8, 1990).

Außerdem gibt es noch einen ***magnetischen Sinn***, der von vielen Vogelarten als Kompaß eingesetzt wird (Übersicht in Waterman, 1990). Bei Bienen ist er zwar ebenfalls vorhanden,

Informationsquelle	*Funktion /Definition*	*Informationsliefernde Sinnesmodalität*	*Literatur*
Landmarken	Referenzpunkte in der Umgebung	v.a. visuell, prinzipiell aber in allen exterozeptiven Systemen denkbar	Wehner, 1992; Collett, 1996; (Cohen und Schuepfer, 1980); Aginsky, 1996; Siegel und White, 1975; Allen et al., 1979; Allen et al., 1978; Chapuis et al., 1983
Kompaß	globale Referenzrichtung	- magnetisch - visuell: Sonnen-, Polarisations- und Sternenkompaß - elektrisch	Waterman, 1990; Wehner, 1992; beim Menschen: Baker, 1980; Baker,1987; Gould und Able, 1981
Bewegungsentscheidungen	Element für Routenlernen (gemeinsam mit Landmarken, evtl. auch topologische oder metrische Karte)	- bewußte Entscheidung - Wiederholung eines motorischen Programms (propriozeptive Information) - Information über ausgeführte Bewegung durch optischen Fluß	Gillner, 1997, Aginsky, 1995
Wegintegration	Richtungen und Distanzen zwischen zwei Orten; zur Berechnung eines Heimvektors oder Aufbau einer metrischen Karte	- propriozeptiv - visuell: optischer Fluß - Kombination von Distanzmessung oder Zeitmessung und Bewegungsentscheidungen bzw. Wahrnehmung von Richtungsänderungen	Wehner, 1992; Fujita et al., 1993

Tab. 1: Übersicht über verschiedene Informationsquellen, deren Funktion und Sinnesmodalitäten, von denen die jeweilige Information geliefert werden kann, und Literaturangaben in bezug auf die jeweiligen Informationsquellen.

spielt für Navigation offensichtlich jedoch keine Rolle. Auch beim Menschen wird ein magnetischer Sinn diskutiert (Baker, 1980; Baker, 1987), die Untersuchungen konnten jedoch teilweise nicht reproduziert werden (Gould und Able, 1981).

Auch durch ***Kommunikation*** - wie z.B. der Schwänzeltanz bei Bienen, die oben genannten Pheromonsignale bei Ameisen oder Sprache beim Menschen - kann Information weitergegeben werden. Die Fähigkeit des Menschen, Information über die Umgebung auch durch Karten aufzunehmen oder weiterzugeben, kann man als einen weiteren sensorischen Wahrnehmungsmechanismus auffassen.

Auch diese Vielzahl an bekannten Mechanismen reicht nicht aus, um alle beobachteten Navigationsleistungen zu erklären. So kann das Heimfinden von Tauben immer noch nicht befriedigend erklärt werden. Statt neuen, unbekannten Mechanismen könnten aber auch schon bekannte Informationsquellen in einer bisher nicht verstandenen Weise herangezogen werden.
Für den Menschen scheint vor allem visuelle Information wichtig zu sein, aber auch propriozeptive und vestibuläre Information könnten eine große Rolle spielen. Auditorische Information dürfte eine geringere Rolle spielen. Der Geruchssinn ist dagegen für den Menschen anscheinend unwichtig - von vielen Menschen wird sein Verlust nicht einmal als negativ empfunden. Eine wichtige Informationsquelle dürften aber auch die verschiedenen Kommunikationsmöglichkeiten darstellen.

2.4 Rolle von angeborenem Verhalten und Lernen

Aus evolutionsbiologischer Sicht kann Anpassung des Verhaltens an unterschiedliche Umgebungen in zweierlei Weise geschehen: einerseits kann Verhalten in genetisch fixierter Form weitergegeben werden, andererseits kann die Anpassung durch Lernen während der Individualentwicklung des Lebewesens geschehen.
Angeborenes Verhalten hat den Vorteil, daß es sofort ausgeübt werden kann. Die Handlungen laufen automatisch ab - es muß also keine weitere Aufmerksamkeit darauf verwendet werden. Ihre neuronale Implementation erfordert in der Regel verhältnismäßig wenig Neurone und ist somit auch mit kleinen Gehirnen machbar. Andererseits ist das Verhaltensmuster meist sehr streng fixiert und dementsprechend inflexibel. Lernen ermöglicht dagegen eine flexible Anpassung an sich ändernde Umstände. Der Nachteil ist allerdings, daß erst eine Lernphase durchlaufen werden muß, bevor das Verhalten ausgeführt werden kann. In der Lernphase spielt Aufmerksamkeit meist eine wichtige Rolle. Mit häufigen Wiederholungen kann die Handlung immer stärker automatisch vollführt werden. So können alltägliche Navigationsleistungen zu einem Großteil eher unbewußt ablaufen, auch wenn es sich ursprünglich um erlernte Verhaltensweisen handelt.
Zwischen diesen beiden grundsätzlich unterschiedlichen Mechanismen ist auch eine Vielzahl von Zwischenstufen denkbar: Die Grundmechanismen eines bestimmten Verhaltens können angeboren sein, diese dann aber durch Lernen in unterschiedlich starkem Maße verfeinert oder modifiziert werden. So scheint das Verhalten bei Langstreckenwanderungen vielen Vögeln oder anderen Tieren größtenteils angeboren zu sein, aber auch Lernen einen gewissen Beitrag dazu zu leisten (Waterman, 1990). Ein anderes Beispiel ist die wohl grundlegende (angeborene) Strategie des Menschen und der meisten Tiere, Landmarken zur Navigation zu benutzen. Aus der Fülle der Information in der Umwelt muß jedoch die relevante Information herausgesucht werden. Welche Objekte in der Umwelt aussagekräftig genug sind, um erfolgreiches Navigationsverhalten zu gewährleisten, muß erst erlernt werden. Dies hat im Ver-

gleich zu rein angeborenem Verhalten den Vorteil, daß Landmarken entsprechend der Umwelt ausgesucht werden. In der Stadt könnten dies z.B. auffällige Gebäude sein, im Wald wären dagegen seltene Pflanzenarten oder Wildwechsel als Landmarken vorstellbar. Bei Studien über den Landmarkenerwerb im Laufe der Individualentwicklung zeigte es sich, daß sich Kinder häufig Objekte merken, die zwar auffällig sind, den Weg aber nicht eindeutig beschreiben, weil sie z.B. mehrmals vorkommen (Allen et al., 1979). Erwachsene finden außerdem einen Rückweg besser, wenn sie auf dem Hinweg mehrmals zurück blicken, während diese Strategie sechsjährigen Kindern nicht hilft (Cornell et al., 1992). Die Autoren schließen daraus, daß Kinder sich weniger effektive Landmarken merken.
Erlerntes Verhalten muß aber von Generation zu Generation nicht vollständig verloren gehen. Erworbenes Wissen kann durch Kommunikation weitergegeben werden. Dadurch können Navigationsmechanismen entstehen, die typisch für bestimmte Kulturen sind. Ein solches kulturspezifisches, sehr ausgefeiltes Navigationssystem verwenden die Puluwat, ein polynesisches Inselvolk, das lange Strecken mit einfachen Booten über Wasser zurücklegt. Dazu setzen sie Koppel-, Sicht- und Himmelsnavigation ein (nach Waterman, Kapitel 4, 1990). Sie nehmen außerdem auch lokale Eigenheiten der Wolkenbildung, der Wellenmuster, des Windes und der Tierwelt zu Hilfe.

2.5 Typen von Ortsrepräsentationen

Aus den Informationen, die aus der Vielfalt von Reizen aus der Umwelt aufgenommen werden, können Ortsrepräsentationen aufgebaut werden. Die Ortsrepräsentationen werden zusammen mit einer Strategie zur Planung von Navigationsverhalten eingesetzt. So muß, damit z.B. ein bestimmter Ort zielgerichtet ein zweites Mal aufgesucht werden kann, erst einmal eine Erinnerung, d.h. Repräsentation, an diesen Ort und Wissen, wie man dort hinkommt, bestehen. Dabei stellen verschiedene Verhaltensweisen unterschiedliche Mindestanforderungen an diese Repräsentationen. Auf die am häufigsten diskutierten Formen der Ortsrepräsentationen und der Verhaltensweisen, die durch diese gewährleistet werden können, soll in diesem Abschnitt näher eingegangen werden (Übersicht in Tab. 2).

Repräsentationstyp	*Eigenschaften*	*Literatur*
Heimvektor	ermöglicht Rückkehr zum Ausgangspunkt auf direktem Weg (intensiv untersucht bei Ameisen)	Wehner, 1992; Maurer und Séguinot, 1995
Assoziation von Landmarken und Bewegungsentscheidungen	Konditioniertes Lernen, ermöglicht Wiederholung einer Handlung im Raum	Cartwright und Collet, 1983; Ruddle, 1997
Routenwissen	Kette von Assoziationen von Landmarken und Handlungen, ermöglicht Wiederholung von Wegen	Allen et al., 1978; Gillner, 1997; Cornell et al., 1992
Topologische Karte	Orte sind durch Wege miteinander vernetzt; Verknüpfung von Teilen sich überkreuzende Routen zu neuen Routen	Gillner, 1997; Mallot und Schölkopf, 1995; Byrne, 1979
Metrische Karte	enthält metrische Beziehungen zwischen verschiedenen Orten; von den genannten Repräsentationen am flexibelsten, auch Finden von Abkürzungen über unbekanntes Gebiet möglich	Thorndyke und Hayes-Roth, 1982; Gallistel, 1990; Siegel und White, 1975

Tab. 2: Überblick über verschiedene Ortsrepräsentationen, deren Eigenschaften und Literaturangaben dazu.

2.5.1 Heimvektor

Ein Heimvektor gibt Richtung und Distanz zu einem Ausgangspunkt an, z.B. einem Nest. Er ermöglicht effizientes Heimkehren. So kann die Wüstenameise Cataglyphis von einem gewundenen Auswärtsweg auf direktem Weg - also einer Abkürzung über unbekanntes Gebiet - zum Heim zurücklaufen (Wehner, 1992). Der Heimvektor wird auf einer Exkursion im Arbeitsgedächtnis kontinuierlich aktualisiert. Insofern ist die Nutzung eines Heimvektors für Verhalten recht eingeschränkt. Werden Vektoren jedoch im Langzeitgedächtnis gespeichert, können sie in Assoziation mit bestimmten Orten (Start- oder Entscheidungspunkte, Landmarken) Teile eines Routengedächtnisses oder einer topographischen Karte bilden, die flexibleres Verhalten ermöglichen.

2.5.2 Assoziation von Landmarken mit Bewegungsentscheidungen oder Richtungsvektoren

Man kann Assoziationen von Landmarken mit Bewegungsentscheidungen oder Richtungsvektoren als eine instrumentelle Konditionierung ansehen. Vorteil einer so einfachen Repräsentation ist, daß sie wenig Verarbeitungskapazität erfordert. Andererseits ist sie in ihrer Anwendung sehr beschränkt und inflexibel. Wenn das Tier sich der Landmarke von einer ungewohnten Richtung nähert, führt eine einfache Bewegungsassoziation wie "nach rechts" oder "nach links" zum Einschlagen einer Richtung, die nicht zum Ziel führt. Es ist ein etwas weiter entwickeltes Modell denkbar, das den Einfluß der Annäherungsrichtung mit in Betracht zieht. Dies könnte z.B. durch globale Landmarken, Kompasse oder Richtungsinformation aus der Integration der Eigenbewegung geschehen. Diese könnten entweder dazu benutzt werden, daß die Landmarke das Verhalten nur dann beeinflußt, wenn sich das Tier aus einer bestimmten Richtung nähert, oder daß ein zugehöriger Algorithmus die Veränderung des Richtungsvektors bei verschiedenen Annäherungsrichtungen berechnet.
Ein derartiges Verhalten scheint bei Bienen zu existieren. Cartwright und Collett (1983) schlugen ein Schnappschuß-Modell vor, bei dem Ansichten von der Umgebung im Sinne einer Landmarke benutzt werden. Die Biene nimmt von ihrem Ziel aus - z.B. einer Futterstelle oder ihrem Heim - einen Schnappschuß von der Umgebung auf, mit dessen Hilfe sie das Ziel wiederfinden kann. Ihre Strategie scheint dabei zu sein, sich nach internen Regeln so zu bewegen, daß sich das Retinabild mit dem gespeicherten Schnappschuß deckt. Wenn im Experiment die Ausrichtung der Landmarkengruppe, die die Position des Zieles markiert, stark verändert wird, zeigt die Biene jedoch randomisiertes Suchverhalten. Offensichtlich hat die Biene eine Erwartung über die Ausrichtung der Landmarkengruppe. Weicht diese von ihrer Erwartung zu sehr ab, kann sie ihren Schnappschuß nicht benutzen. Der Mechanismus, der Bienen Informationen über die globale Ausrichtung gibt, ist bisher unbekannt.

2.5.3 Routenwissen

Routen sind sensomotorische Routinen, die eine Landmarke mit einer anderen konzeptuell verbinden (Allen et al., 1978). Diese kann man sich als eine Sequenz von Landmarken vorstellen, die jeweils mit einer Bewegungsentscheidung assoziiert sind. Allgemein ermöglichen solche Assoziationen von Landmarken mit Bewegungsentscheidungen das Wiederfinden von Wegen und des Heimes. Zu Konflikten kommt es, wenn eine bestimmte Landmarke Bestandteil von zwei verschiedenen Routen ist. Dieses Problem läßt sich lösen, wenn die

Handlungssequenz zielabhängig ausgeführt wird. So kann durch Vorgabe eines anderen Ziels die Handlung an der fraglichen Landmarke beeinflußt werden.

2.5.4 Topologische Karte

Routenwissen allein ist immer noch sehr inflexibel. Erst wenn mehrere Routen miteinander verknüpft werden, entsteht Überblickswissen (konfiguratives Wissen), das auch echte Wegplanung wie das Finden eines bekannten Ziels von anderen Startpositionen aus ermöglicht. Eine topologische Karte gibt dabei Information über Vernetzung von verschiedenen Orten in der Umwelt. Sie reicht aus, um eine Vielzahl der beobachteten Navigationsverhalten einer Reihe von Lebewesen, einschließlich des Menschen, zu erklären.
Tolman (1948) stellte fest, daß Ratten in einem Labyrinth nicht nur den Weg lernen, der zum Ziel führt, sondern auch über andere Wege Information speichern. Diese Art von Lernen geht über eine Konditionierung hinaus, da hier Wissen erworben wird, das zu jenem Zeitpunkt zur Erfüllung der Aufgabe nicht notwendig ist, später aber in einer anderen Aufgabe die Leistung verbessert. Er bezeichnete dies als latentes Lernen. Untersuchungen bei Menschen zeigen, daß Information von zwei getrennt erworbenen Wegen in eine Repräsentation integriert werden kann (Gillner, 1997; Moar und Carleton, 1982).
Zwei spezifische topologische Modelle, das eines Ansichtengraphen und das eines Platzgraphen, wurden von Schölkopf und Mallot (1995) vorgeschlagen. Dabei bilden Ansichten (Ansichtengraph) bzw. Plätze (Platzgraph) und die Bewegungen, die diese miteinander verbinden, die Elemente einer topologischen Repräsentation. Der Ansichtengraph kann in einen Platzgraph übergehen, indem die adäquaten Ansichten zu einer Platzrepräsentation zusammengefaßt werden. Schölkopf und Mallot (1995) implementierten das Modell in einem neuronalen Netzwerk. Dabei zeigte sich, daß auch das Wiedererkennen von Plätzen durch die im Modell inhärente topologische Information verbessert wird.

2.5.5 Metrische Karte

Die flexibelsten Anwendungsmöglichkeiten werden durch eine *metrische Karte* gewährleistet. Über die Information über die Vernetzung von Orten hinaus enthält sie auch metrische Information, d.h. Information über Distanzen und Winkel. Dies macht sie sehr vielseitig einsetzbar. Alle angesprochenen grundlegenden Leistungen, auch das Finden von Abkürzungen, können von ihr erfüllt werden.

2.6 Modelle für Ortsrepräsentationen

Die Vorstellungen davon, wie die Ortsrepräsentation aussehen könnte, haben sich im Laufe der Zeit verändert und weiterentwickelt. Hier soll ein kurzer Abriß der wichtigsten vorgeschlagenen Modelle gegeben werden. Dabei soll insbesondere auf den Begriff der kognitiven Karte eingegangen werden und die Diskussion, ob der Mensch eine metrische Karte besitzt, aufgegriffen werden.

2.6.1 Überblick über Modelle für Ortsrepräsentation

Der Begriff der **kognitiven Karte** wird für die räumliche Repräsentation des Menschen und auch einer Reihe von Tieren verwendet. Dabei ist der Begriff kognitive Karte aber im Laufe

der Zeit von verschiedenen Autoren mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt worden (Bennett, 1996). Er ist auch insofern ungünstig, als daß er das Vorliegen einer metrischen Karte suggeriert, dies aber nicht von allen Autoren gemeint ist. Man sollte deshalb vielleicht neutraler von einer räumlichen Repräsentation sprechen. Die Hauptdefinitionen für die kognitive Karte wurden von Tolman, O'Keefe und Nadel und Gallistel vorgeschlagen und sollen im folgenden zusammen mit einigen anderen Modellvorstellungen, die einen starken Einfluß ausgeübt haben, in einem historischen Überblick genauer erörtert werden (siehe auch Tab. 3).

Tolman führte 1948 den Begriff der kognitiven Karte ein, der für die weitere Forschung und Diskussion von Ortsrepräsentationen über lange Zeit prägend sein sollte. Er stand damit im Gegensatz zu den Behavioristen, die jegliches Verhalten inklusive der Navigationsleistungen als Folge von Konditionierungen ansahen. Tolman zeigte, daß Ratten auch räumliche Eigenschaften eines Labyrinths lernten, die zum erfolgreichen Ausführen der Aufgabe nicht notwendig waren, also auch nicht konditioniert sein konnten. Die kognitive Karte definierte er als eine Repräsentation, die Informationen über Routen, Pfade und räumliche Beziehungen in der Umwelt enthält. Diese Informationen würden für das Navigationsverhalten benötigt, d.h. um Entscheidungen bezüglich der Bewegungen zu treffen. Das Finden von neuen Abkürzungen über unbekanntes Gelände ist ein hervorstechendes Merkmal dieser Repräsentation. Dabei geht Tolman implizit von einer metrischen Karte als zugrunde liegender Repräsentation aus. Das Finden von Abkürzungen kann aber auch durch andere Mechanismen - wie durch die oben erwähnten Heimvektoren oder Schnappschüsse (Cartwright und Collett, 1983; Franz et al., 1997) - geleistet werden und ist somit kein zuverlässiger Indikator für eine metrische Karte.

In bezug auf den Inhalt der kognitiven Karte stellte Lynch (von Beruf Stadtplaner) 1960 eine Arbeit vor, die die weitere Untersuchung der Ortsrepräsentationen beim Menschen in der Folge ebenfalls stark beeinflußte. Er ließ Versuchspersonen Karten ihrer Heimatstädte zeichnen und strukturierte diese dann unter subjektiven Gesichtspunkten in verschiedene Elemente. Er unterschied dabei Wege (paths), Wegkreuzungen (path intersections), konzeptuelle Ankerpunkte (nodes), Landmarken, Stadtteile (districts) und Grenzen (boundaries) als Strukturelemente der gezeichneten Karten.

Eine weitere einflußreiche Arbeit veröffentlichten Siegel und White (1975). Sie schlugen in ihrem Modell vor, daß die Bildung der Ortsrepräsentation des Menschen bestimmte Stufen durchläuft: zuerst wird Landmarkenwissen erworben, daraus kann Routenwissen aufgebaut werden, daraus wiederum Überblickswissen (d.h. eine metrische Karte). Mehrere Untersuchungen widersprechen dem Modell aber. So ist der Erwerb von Landmarken auch abhängig von der Route: Objekte an Kreuzungen werden häufiger als Landmarken gewählt (Cohen und Schuepfer, 1980; Aginsky, 1996). In bezug auf das Verhältnis von Routen- und Überblickswissen unterstützen andere Experimente die Ansicht, daß es keinen qualitativen Sprung von einer Repräsentationsart in die andere gibt, sondern daß beide Formen im Laufe der Zeit quantitativ korrekter werden (Ruddle et al., 1997). Mit zunehmender Vertrautheit mit einer Umgebung können Alternativwege zu einem bestimmten Ziel gelernt werden, die die mögliche Lage der einzelnen Orte weiter einschränken und somit eine korrektere Metrik ermöglichen. Für diese Interpretation sprechen auch Untersuchungen (Evans et al., 1981), die mit zunehmender Erfahrung in einer Stadt (2 Wochen gegenüber 10 Monaten) zwar eine Verbesserung bei der Einschätzung der absoluten Position, nicht aber der relativen (ordinalen) Lage fanden. Versuche von Aginsky (1996) deuten darauf hin, daß sich Versuchspersonen individuell darin unterschieden, ob sie sich beim Treffen von Navigationsentscheidungen stärker

auf Routenwissen (visually dominated strategy) oder Überblickswissen (spatially dominated strategy) verlassen.

Mit der Entdeckung von Platz-Zellen im Hippocampus der Ratte in der neurobiologischen Forschung wurden auch an Ergebnissen aus diesem Forschungsbereich orientierte Modelle vorgeschlagen. So unterscheiden O'Keefe und Nadel (1978) zwischen einem "Taxon"-System und einem "Locale"-System. Das Taxon-System besteht aus Stimulus-Reaktions-Ketten; die räumlichen Beziehungen werden in egozentrischen Koordinaten gespeichert. Bei dem "Locale"-System handelt es sich dagegen um Kartenwissen: Plätze sind in einem Netzwerk untereinander durch räumliche Transformationsregeln verbunden. Das System ist allozentrisch und enthält auch Informationen über Distanzen und Winkel (die allerdings verzerrt sein können). Als neuronales Substrat dieser beiden Systeme schlagen sie den Hippocampus vor. McNaughton und Chen (1989) schlagen als Modell für eine Ortsrepräsentation Assoziationen von Ansichten und Bewegungsentscheidungen vor.

Gallistel (1990) definiert eine kognitive Karte wesentlich allgemeiner als eine Aufzeichnung im zentralen Nervensystem von Eigenschaften des Raumes, die genutzt werden, um Wege in der Umgebung zu planen. Dabei werden Dinge erinnert, die außerhalb des gegenwärtigen sensorischen Rahmens liegen. So können momentan nicht sichtbare Ziele in die Planung von Wegen einbezogen werden. Eine Repräsentation ermöglicht also ganz allgemein einen flexibleren Umgang mit Wegen in der Umwelt. Er schlägt vor, die Art der jeweiligen kognitiven Karte nach mathematisch definierten Geometrien (z.B. euklidisch, affin, projektiv, topologisch) festzulegen. Aufgrund eigener Ergebnisse und anderer Untersuchungen kommt er zu dem Schluß, daß fast alle Tiere euklidische Karten haben. Er betont besonders die metrischen und geometrischen Eigenschaften dieser Karten. Zwei Prozesse führen seiner Ansicht nach zu allozentrischen, metrischen Karten: Erstens wird eine metrische Repräsentation von Punkten, Linien und Flächen in der Umwelt in egozentrischen Koordinaten gebildet. Zweitens werden durch Wegintegration die allozentrischen Koordinaten von Aussichtspunkten (vantage points) und Blickrichtungen festgehalten. Durch die Kombination dieser beiden Repräsentationen entsteht die allozentrische metrische Karte.

Ein neueres, sowohl an Verhaltens- als auch an neurobiologischen Daten orientiertes Modell stammt von Poucet (1993). Er postuliert, daß es gleichzeitig zwei verschiedene Repräsentationen gibt: eine topologische im Hippocampus und eine, die metrische Informationen enthält, im posterioren Parietalcortex. Er schlägt folgenden Aufbau der Repräsentation vor: Die Grundeinheiten der Repräsentation sind Platzrepräsentationen, in denen mehrere, durch Eigenrotation verbundene Ansichten zusammengefaßt werden. Aus mehreren Platzrepräsentationen, die Stimuluselemente in der proximalen oder distalen Umgebung gemeinsam haben, werden lokale Karten (local charts) mit assoziierten Vektoren aufgebaut. Diese Vektoren weisen zu benachbarten lokalen Karten. Zunächst bilden diese Karten seiner Ansicht nach ein topologisches Netzwerk, wobei die Vektoren im Verhältnis zu lokalen Referenzrichtungen aufgezeichnet werden. Später werden dann alle lokalen Karten in eine gemeinsame Repräsentation integriert, die auch metrische Information enthält; dabei bekommen die lokalen Karten dann auch eine gemeinsame Referenzrichtung (z.B. Norden).

In neueren Untersuchungen findet sich auch immer häufiger eine Unterteilung des Raumes in mehrere Unterräume, die sich in ihrer Größe und der Art der vorhandenen Information unterscheiden. Eine wesentliche Unterscheidung ist, ob ein Raum von einem Standpunkt aus übersehbar (Kleinfeldumgebung) ist oder nicht (Großfeldumgebung). Es erscheint plausibel, daß

sich aufgrund der unterschiedlichen Informationen in den verschiedenen Räumen auch deren Repräsentationen unterscheiden. In Experimenten von Uttal und Wellman (1989) zeigten sich zwischen Kleinfeld- und Großfeldumgebungen unterschiedliche Ergebnisse für das Verstehen von Karten bei Kindern. Colle und Reid (1998) fanden bei Versuchen in einer virtuellen Umgebung, daß Richtungen von Objekten innerhalb eines Raumes korrekter erinnert werden als solche in verschiedenen Räumen. Es gibt viele Studien, nach denen Tiere Distanzen und Winkel gut wahrnehmen. Diese sind jedoch in kleinräumigen Umgebungen (z.B. Gallistel, 1990) gemacht worden, und es ist fraglich, ob die Ergebnisse auf Großfeldumgebungen direkt übertragbar sind. Die Unterscheidung Kleinfeld- und Großfeldumgebung findet sich in etwa auch in Poucets (1993) Modell als Differenzierung in lokale Karten und einer sich aus diesen lokalen Karten zusammensetzenden Repräsentation wieder. Zumindest einige der Unterschiede zwischen den Modellen können vielleicht darauf zurückgeführt werden, daß diese auf Versuchsergebnissen aus unterschiedlichen Unterräumen basieren.
Aber auch andere Bedingungen können die Repräsentation beeinflussen, z.B. die jeweilige Aufgabe, die Explorationsbedingungen oder Eigenschaften der jeweiligen Umgebung selbst. So bestehen in verschiedenen Umwelten unterschiedliche Möglichkeiten zur Anwendung hierarchischer Konzepte oder allgemeiner Regeln wie sie sich z.B. durch Rechtwinkligkeit und Parallelität der Straßen im "City-Block-Raster" ergeben. Auch im normalen Explorationsverhalten zeigen sich Strategien für den effizienten Erwerb von Ortsinformation. Beschränkt man die Art, in der Ratten ein Labyrinth explorieren, hat dies Auswirkungen auf ihre Leistungen. So können sie sich bei einer Wegfindeaufgabe je nach Trainingsmodus entsprechend einer topologischen oder metrischen Repräsentation verhalten (Thinus-Blanc, 1996).
Das beobachtete Verhalten wird aber nicht nur durch die zugrunde liegende Repräsentation, sondern auch durch die jeweils gewählte Strategie beeinflußt. So ist für durchaus anspruchsvolles Navigationsverhalten die Kombination einer Strategie mit Arbeitsgedächtnis ausreichend. Bestimmte Springspinnenarten (z.B. *Portia fimbriata*) machen zunächst scannende Augenbewegungen, um einen relativ komplizierten, durchgehenden Weg zur Beute zu finden und diesen gefundenen Weg schließlich einzuschlagen (Tarsitano, 1997). Für Hunde ist gezeigt worden, daß sie von zwei möglichen, bekannten Wegen zu einem vom Startpunkt nicht sichtbaren Ziel meist die kürzere Alternative wählen. Ist das Ziel dagegen sichtbar, wählen sie den Weg, der direkter auf das Ziel zuführt, auch wenn dieser länger ist (Chapuis et al., 1983). Dies zeigt, daß die Ortsrepräsentation von Hunden zwar metrische Information enthält, diese aber nicht immer genutzt wird. Offensichtlich hat sie vor allem dann Einfluß, wenn das Ziel

Literatur	*Modelle für Ortsrepräsentationen*
Tolman, 1948	Einführung des Begriffes "kognitive Karte"; latentes Lernen
Lynch, 1960	Unterteilung von durch Versuchspersonen gezeichneten Karten in Wege, Wegkreuzungen, Ankerpunkte, Landmarken, Stadtteile und Grenzen
Siegel und White, 1975	Hierarchisches Modell über Erwerb räumlichen Wissens: zuerst Landmarkenwissen, dann Routen- und schließlich Überblickswissen
O'Keefe und Nadel, 1978	Hippocampus als Ort zweier verschiedener Repräsentationen: "Taxon"- und "Locale"-System
McNaughton und Chen, 1989	Assoziationen von Ansichten und Bewegungsentscheidungen
Gallistel, 1990	Gruppierung von kognitiven Karten nach mathematisch definierten Geometrien (z.B. topologisch, affin oder metrisch)
Poucet, 1993	durch Vektoren miteinander verbundene lokale Karten
Bennett, 1996	kritische Diskussion der Literatur über kognitive Karten

Tab. 3: Modelle für Ortsrepräsentationen verschiedener Autoren.

nicht sichtbar ist. Außerdem deuten die oben bereits angesprochenenen Versuche von Aginsky et al. (1996) darauf hin, daß eine gegebene Navigationsaufgabe von verschiedenen Versuchspersonen durch unterschiedliche Strategien gelöst werden kann.

Es zeigt sich, daß allgemeingültige Aussagen über Navigationsmechanismen und Repräsentationen schwer zu machen sind. Bei verschiedenen Tierarten und Situationen haben sich zur Lösung der spezifischen Anforderungen jeweils angepaßte Strategien entwickelt. Dennoch gibt es dabei bestimmte Elemente, die häufig wiederkehren.

2.6.2 Ist die räumliche Repräsentation des Menschen metrisch?

Eine andere, häufig diskutierte Frage ist, ob die räumliche Repräsentation des Menschen metrisch ist. Es kann als gesichert gelten, daß die räumliche Repräsentationen des Menschen auch Informationen über Distanzen und Winkel enthält. Zahlreiche Untersuchungen, in denen Winkel oder Distanzen zwischen nicht sichtbaren Orten in der Umwelt geschätzt werden sollten, zeigten eine recht gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Gegebenheiten. Durch multidimensionale Skalierungs-techniken läßt sich aus diesen Daten wieder eine metrische Karte rekonstruieren, die sich ebenfalls recht gut mit einer topographischen Karte deckt (z.B. May, 1992; Howard und Kerst, 1981). Ungeklärt bleibt dabei aber, ob die metrische Information tatsächlich in Form einer kohärenten Karte vorliegt oder z.B. als Attribut mit bestimmten Orten oder Wegen assoziiert ist.
Die Untersuchungen zeigen aber gleichzeitig auch, daß die metrische Information bestimmten Verzerrungen und Vereinfachungen unterliegt. So werden Straßenkreuzungen in der Regel als rechtwinklig eingeschätzt, solange die tatsächlichen Winkel nicht sehr stark (weniger als 30°) vom 90°-Winkel abweichen (Byrne, 1979). Auch Distanzen werden in charakteristischer Weise über- oder unterschätzt. So werden einerseits die Längen von Straßen mit Kurven gegenüber geraden Straßen und andererseits die Länge von Straßen in Stadtzentren gegenüber Außenbezirken überschätzt (Byrne, 1979). Ebenso werden Strecken, die sich über mehrere Untereinheiten einer Route ausdehnen, überschätzt (Allen und Kirasic, 1985). Distanz- und Richtungsschätzungen können in einigen Fällen auch asymmetrisch sein und von übergeordneten hierarchischen Gliederungen bestimmt sein (Moar und Bower, 1983; Allen und Kirasic, 1985; Stevens und Coupe, 1978).
Auch durch räumliches Priming können Aussagen über die Repräsentation gemacht werden. Dabei werden Reaktionszeiten zwischen einem Primingobjekt und der Reaktion auf ein Testobjekt ausgewertet. Eine Aufgabe kann beispielsweise sein, zu entscheiden, ob ein bestimmtes Objekt zu einer gelernten räumlichen Konfiguration gehört oder nicht. Unterschiede in den Reaktionszeiten spiegeln dabei Distanzen zwischen Priming- und Testobjekt wieder. Bei Lernen von Karten zeigte sich beim Primingeffekt ein Einfluß der zeitlichen Nachbarschaft (McNamara et al., 1992).
In gewisser Weise gegen eine metrische Karte sprechen Experimente, die Leistungen vergleichen, die auf dem Studium einer Karte oder Lernen der tatsächlichen Umgebung beruhen. Hierbei zeigt sich bei den meisten Untersuchungen, daß nach Kartenlernen Luftlinien-Distanzen und unter bestimmten Umständen auch Winkel besser geschätzt werden können (Thorndyke und Hayes-Roth, 1982). Diese Unterschiede verringern sich allerdings mit zunehmender Vertrautheit mit der Umgebung. Giraudo und Pailhous (1994) fanden Unterschiede in Ungenauigkeiten und Fluktuationen der Fehler zwischen zwei Versuchsgruppen, wenn sechsmal hintereinander 18 Orte auf einer Karte positioniert werden sollten. Die erste Gruppe kannte die Orte durch den Alltag; bei ihnen waren Ungenauigkeiten und Fluktuationen der

Fehler gleich groß. Bei der zweiten Gruppe dagegen, die die Orte anhand einer Karte gelernt hatte, war die Ungenauigkeit größer als die Fluktuation. Außerdem zeigt sich beim Lernen durch eine Karte eine Orientierungsabhängigkeit, die bei Lernen in der Umgebung nicht besteht (Presson und Hazelrigg, 1984)
Die Gesamtheit der Experimente deutet darauf hin, daß die Ortsrepräsentation des Menschen metrische Informationen enthält, daß diese aber anders organisiert sind als in einer topographischen Karte.

2.7 Neuronale Substrate

Wissen über neuronale Substrate räumlicher Repräsentationen wurden vor allem durch elektrophysiologische Ableitungen und Läsionsstudien an Ratten gewonnen. In bezug auf den Menschen stammen Erkenntnisse größtenteils aus Studien über Patienten mit Läsionen infolge von Schlaganfällen oder Tumoren; in neuerer Zeit sind durch Untersuchung der Gehirntätigkeit mit bildgebenden Verfahren (wie PET oder fMRI) auch Experimente mit gesunden, sogar handelnden Menschen möglich (Maguire, 1997, Tab. 4).
Bei Ratten wurden in elektrophysiologischen Untersuchungen in den CA1- und CA3-Regionen des Hippocampus sogenannte Platzzellen (place cells) gefunden (O'Keefe u. Dostrovsky, 1971). Diese Zellen feuern immer dann, wenn sich das Tier in einem bestimmten Bereich der Umgebung aufhält, dem sogenannten Platzfeld (place field). Das Feuern einiger dieser Zellen ist unabhängig von der momentanen Blickrichtung (heading) und auch von der Richtung, von der aus das Feld betreten wurde. In anderen Fällen läßt sich das Feuerverhalten der Platzzellen im Hippocampus aber am besten charakterisieren, wenn außerdem auch Bewegungsrichtung oder Geschwindigkeit berücksichtigt werden (Eichenbaum et al., 1989). Dabei scheint es in engen Räumen wie den Gängen eines Labyrinths einen stärkeren Zusammenhang des Feuerverhaltens mit Richtungsfaktoren zu geben als in offenen Versuchsanordnungen wie einem Open-field. Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen zeigte sich in einer Simulation durch ein neuronales Netzwerk (Sharp, 1991). Dabei kam es bei Umgebungen, in denen sich die Ansichten stark unterscheiden (z.B. in Labyrinthen, wo aufgrund der Trajektorien nur zwei Ansichten von einem Platz aus möglich sind) zu getrennten Repräsentationen des Ortes.
Verschiedene Versuchsergebnisse sprechen dafür, daß die Antwort der Platzzellen die Perzeption des Tieres widerspiegelt. Die Platzzellantworten reagieren zwar auf äußere - insbesondere visuelle - Reize, sind aber nicht direkt abhängig von diesen. Wird eine Versuchsumgebung maßstabsgetreu vergrößert, vergrößert sich auch das Platzfeld, behält aber seine Lage relativ zu distalen Landmarken bei. Besonders deutlich zeigen sich diese perzeptuellen Charakteristika in Versuchen in einem Open-field, das von der Umgebung durch einen Vorhang abgeschirmt ist und in dem ein großflächiger visueller Stimulus der Ratte als Orientierungshilfe dienen kann. Gegenüber dem ursprünglichen Feuermuster der Platzzellen löst die Rotation des visuellen Stimulus eine entsprechende Rotation der Platzfelder aus, wenn sich die Ratte während der Stimulusrotation nicht in der Versuchsapparatur befindet. Hält sich die Ratte dagegen während der Stimulusrotation im Open-field auf, bleibt das Feuern der Platzzellen in bezug auf die Weltkoordinaten stabil, ist aber gegenüber dem visuellen Stimulus verschoben (Rotenberg und Muller, 1997). In Versuchsanordnungen mit einer Reihe von Landmarken können außerdem mehrere davon entfernt werden, ohne daß sich das Antwortverhalten der Zellen ändert (Muller und Kubie, 1987). Platzzellen feuern auch dann, wenn eine Ratte bei Licht in die Testumgebung gesetzt wurde und anschließend das Licht gelöscht wurde, aber nicht, wenn die Ratte in das dunkle Labyrinth gesetzt wurde (Barnes, 1988). In

neuen Umgebungen bilden sich innerhalb weniger Minuten stabile Platzfelder (Wilson und McNaughton, 1993). Es gibt Hinweise darauf, daß das primäre Feuermuster abhängig von propriozeptiver Information ist und dies durch Lernen an andere Information wie z.B. Landmarken gebunden wird (Barnes et al., 1997).
Neuere Untersuchungen deuten jedoch eher darauf hin, daß mehrere Faktoren zur Aktivität von Hippocampus-Zellen beitragen. So zeigten sich Abhängigkeiten von der jeweiligen Aufgabe. Das Feuern von Platzzellen kann auch hinsichtlich unterschiedlicher Bezugsrahmen konstant bleiben: Gothard et al. (1996) veränderten die Position von lokalen Landmarken, deren relative Lage zu einer Belohnung konstant blieb, außerdem auch die Position einer Start- und Endbox, während die Lage von distalen Landmarken unverändert blieb. Unter diesen Bedingungen fanden sie eine Reihe von Platzzellen, deren Feuerverhalten konstant hinsichtlich des distalen Bezugsrahmens blieb, und andere Zellen, die in bezug auf den Start- bzw. Endpunkt oder das Ziel stabil feuerten.
Das Platzfeld einer Zelle muß nicht immer zusammenhängend sein, sondern kann auch aus mehreren, räumlich getrennten Unterfeldern bestehen. Eine einzelne Zelle kann also an mehreren Orten oder auch in Zusammenhang mit verschiedenen Bezugsrahmen feuern. Dabei werden die Orte anscheinend nicht durch einzelne Platzzellen, sondern durch die Dynamik von Zellensembles repräsentiert (Wilson und McNaughton, 1993).
Ein anderer Typ von Zellen findet sich vor allem im Postsubiculum, das Teil des Hippocampus ist. Dort findet man die sogenannten Richtungszellen (head-direction cells), die immer dann feuern, wenn das Tier in eine bestimmte Richtung blickt, unabhängig von dem Ort, an dem es sich innerhalb der Versuchsapparatur gerade befindet. Für Rotationen von großflächigen visuellen Stimuli sind ähnliche Ergebnisse wie für Platzzellen zu beobachten (Taube et al., 1990a; Taube et al., 1990b).

Platzzellen werden häufig als das Substrat der räumlichen Repräsentation angesehen. In einem Modell von Muller et al. (1996) wird die Weglänge zwischen zwei Orten durch Synapsenstärke zwischen zwei Platzzellen kodiert. Nach anderen Modellen sind die Platzzellen Teil eines x-y-Koordinatensystems; eine Weiterleitung der Erregung zwischen ihnen geschieht durch motorischen oder visuellen Input (Mittelstaedt, 1998). Es wurde auch vorgeschlagen, daß Platzzellen hauptsächlich bei der lokalen Navigation eine Rolle spielen, während Richtungszellen für die Navigation zwischen verschiedenen Lokationen (Langstrecken-Navigation) verantwortlich sind (Taube et al., 1990b). Läsionsstudien sprechen allerdings dafür, daß der Hippocampus vor allem für das Lernen von Umgebungen wichtig ist. Wird direkt nach dem Lernen einer neuen Umgebung der Hippocampus zerstört, ist das Gelernte verloren. Bei einem späteren Zeitpunkt der Läsion bleibt jedoch Erlerntes zumindest teilweise erhalten (Barnes, 1988).

Studien an Ratten und vor allem auch an Primaten (einschließlich des Menschen) zeigen, daß auch andere Cortexareale an der Wahrnehmung des Raumes bzw. der Handlung im Raum beteiligt sind. Der Temporalcortex scheint vor allem für objektbezogene Orientierung und Objekterkennung ("was") zuständig zu sein, der Parietalcortex dagegen für räumliche Beziehungen zwischen verschiedenen Objekten ("wo") (Mishkin et al., 1983). Letzterer integriert multimodale sensorische Informationen mit adaptiven motorischen Zielhandlungen im Raum. Somit trägt er auch dazu bei, zielgerichtete Greifakte auszuführen ("wie") (Goodale und Milner, 1992). In PET-Studien wurde u.a. im medialen Parietalcortex eine erhöhte Aktivität gefunden, die in Zusammenhang mit Abrufen von visuellen Szenen (visual imagery) bei episodischem Gedächtnis gesehen und im Sinne einer Speicherung räumlicher Information im egozentrischen Bezugsrahmen interpretiert wird (Maguire et al., 1998). Der parahippocampale

Gyrus wird als Kandidat für ein allozentrisches Bezugsystem oder für die Repräsentation von Objekten im Raum diskutiert (Maguire, 1997) Nach einer fMRI-Studie von Epstein und Kanwisher (1998) scheint der Gyrus parahippocampalis der Repräsentationsort der lokalen visuellen Umgebung zu sein; er ist aktiv in Gegenwart von Information über die Struktur einer lokalen Umgebung, auch wenn diese keine Objekte enthält. Die Funktion des Hippocampus ist für den Menschen schlechter definiert. Allgemein wird ihm eine Funktion generell beim Lernen zugeschrieben. Häufig wird er als Ort der Integration von orts- und objektbezogener Information angesehen, d.h. bei der Zusammenführung von Information über die Position von Objekten im Raum und von Objekteigenschaften (Mishkin et al., 1983; Poucet, 1993; Maguire, 1997). Teile des Frontalcortex (ventromediale orbitofrontale Region) kommen anscheinend vor allem dann ins Spiel, wenn sich Versuchspersonen bei Entscheidungen unsicher sind, z.B. wenn sie sich verirrt haben (Maguire, 1997).

Das Gesamtbild der Studien zeigt, daß an der räumlichen Repräsentation unterschiedliche Strukturen beteiligt sind. Was deren Aufgaben im einzelnen aber genau sind und wie sie das Verhalten beeinflussen, bleibt noch zu klären.

Substrat	*Funktion*	*Literatur*
zelluläre Ebene		
Platzzellen (im Hippocampus)	Feuern ist korreliert mit Ort, an dem sich das Tier befindet (kognitive Leistung)	O'Keefe u. Dostrovsky, 1971; Muller und Kubie, 1987; Barnes, 1988; Eichenbaum et al., 1989; Sharp, 1991; Rotenberg und Muller, 1997; Wilson und McNaughton, 1993; Gothard et al., 1996; Barnes et a., 1997
Richtungszellen (im Postsubiculum)	Zellaktivität korreliert mit der Richtung in Weltkoordinaten, in die das Tier blickt	Taube et al., 1990a; Taube et al. 1990b
Gehirnareale		
Hippocampus	Repräsentation der Umgebung bei Ratten; bei Menschen Funktionen Rolle für Raumgedächntis schlechter definiert	s. Platzzellen; O'Keefe und Nadel, 1978; Mishkin et al., 1983; Poucet, 1993; Muller et al., 1996; Maguire, 1997; Mittelstaedt, 1998
Postsubiculum	"Kompaßsystem"; durch Zusammenwirken mit Platzzellen Aufbau einer metrischen Karte (bei Ratten)	Taube et al. 1990b
Gyrus parahippocampalis	allozentrisches Bezugssystem oder Repräsentation von Objekten im Raum	Epstein und Kanwisher, 1998;
Medialer Parietalcortex	mentales Visualisieren bei episodischem Gedächtnis; räumliche Information in egozentrischem Bezugssystem	Mishkin et al., 1983; Goodale und Milner, 1992; Maguire et al., 1998;
Ventromed. orbitofrontale Region	Abwägen zwischen verschiedenen Handlungen	Maguire, 1997

Tab. 4: Übersicht über neuronale Substrate, die bei einem räumlichen Gedächtnis eine Rolle spielen. Erkenntnisse auf zellulärer Ebene wurden durch Ratten gewonnen; Funktionen neocorticaler Areale beziehen sich vor allem auf den Menschen.

2.8 Versuchsparadigmen

Wie schon erwähnt, wird Forschung über Navigation von sehr unterschiedlichen Disziplinen aus betrieben. Ebenso wie in ihren Grundannahmen und Zielsetzungen unterscheidet sich de-

ren Vorgehen auch in der Wahl bestimmter Versuchsparadigmen. Dabei können die Versuchsparadigmen jeweils nur bestimmte Fragestellungen beantworten.
In diesem Abschnitt sollen einige Paradigmen speziell zur Untersuchung von Navigationsverhalten oder auch allgemein von Wahrnehmungs- und Verhaltensvorgängen beschrieben werden, wie sie z.B. in der Biologie und der Psychologie verwendet werden. Besonders soll dabei auf die Vorteile, aber auch Einschränkungen von virtuellen Umgebungen als Versuchsparadigma eingegangen werden.

2.8.1 Paradigmen für Versuche unter Laborbedingungen und in der realen Welt

Nicht nur die Forschungsdisziplin und die Fragestellung beeinflussen die Wahl von Versuchsparadigmen, sondern auch die Art der Versuchsobjekte; je nachdem, ob Menschen als Versuchspersonen oder welche Tierarten als Versuchstiere dienen, werden in der Regel auch verschiedene Versuchsparadigmen verwendet. Bei Versuchen mit Tieren kann nur deren Verhalten beobachtet werden. Qualitative Angaben über Stimuli oder Einschätzen von Eigenschaften auf einer Skala sind von Menschen leicht, von Tieren dagegen höchstens indirekt durch bestimmte Dressurmethoden zu erhalten. Bei einer Dressur - im Vergleich zu Versuchspersonen direkt gegebenen Anweisungen - besteht außerdem eine größere Unsicherheit darüber, ob auch tatsächlich die beabsichtigte Fragestellung gelernt worden ist.
Bei Tieren als Versuchsobjekten werden meist bestimmte Reize in der Testumgebung oder im Freiland manipuliert und die Auswirkungen auf das Verhalten untersucht. Besonders gründlich wurde dabei in bezug auf Navigationsverhalten die Rolle von Landmarken studiert, insbesondere bei Insekten und Ratten. Bei Ratten werden als Testumgebungen häufig verschiedenartige Labyrinthe eingesetzt. Diese Versuche werden oft kombiniert mit der Manipulation von Landmarken, der elektrophysiologischen Ableitung von Platzzellen oder beidem gleichzeitig. Die verschiedenen Labyrinthe bzw. sonstigen künstlichen Testumgebungen sind jeweils zur Beantwortung nur ganz bestimmter Fragen geeignet. Beispiele dafür sind die Morris-Wasser-Arena (Morris et al. 1982) und das Olton-Labyrinth (Olton et al., 1979). In der Morris-Wasser-Arena befindet sich eine Plattform, durch die die Ratten dem Wasser entkommen können; visuelle Reize an den Wänden der Arena oder in der Umgebung stehen als Landmarken zur Verfügung. Durch Sichtbarkeit der Plattform über Wasserfläche oder deren Untertauchen darunter (und damit Unsichtbarkeit) kann zwischen Leistungen bei egozentrischen und allozentrischen Navigationsstrategien unterschieden werden (siehe z.B. Barnes, 1988). Beim Olton-Labyrinth handelt es sich um ein Labyrinth mit mehreren strahlenförmig auseinanderstrebenden Armen, mit dem z.B. Arbeits- und Referenzgedächtnisfehler voneinander abgegrenzt werden können (nach Thinus-Blanc, 1996). In vielen Varianten werden sogenannte Open-fields eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine "umgrenzte" Umgebung von beschränkten Ausmaßen, in denen sich das Versuchstier relativ frei bewegen kann.

Bei menschlichen Versuchspersonen werden in psychophysischen Experimenten im Labor ebenfalls eine Reihe bestimmter Versuchsparadigmen angewendet. Häufig werden einfache Reizmuster präsentiert und die Reaktion darauf gemessen. Dabei gibt es verschiedene Antwortparadigmen wie die Two-alternative-forced-choice-Methode, wobei von zwei Antwortalternativen in jedem Fall eine gewählt werden muß. Kombiniert wird ein solches Versuchsparadigma häufig mit der Messung von Reaktionszeiten. In bezug auf die Navigation kann davon z.B. bei einem Längenvergleich von zwei Strecken Gebrauch gemacht werden.
Viele der klassischen Versuchsparadigmen von Psychologen zielen auf das Testen von metrischen Eigenschaften der räumlichen Repräsentation ab. Getestet wird in der Regel außerhalb

der Bezugsumgebung. Klassische Paradigmen sind das Schätzen von Distanzen und Richtungen, das Zeichnen von Karten oder Modellrekonstruktionen. Vorteil dieser Methoden ist, daß sie sehr gut kontrollierbar sind. Außerdem sind Schätzungen von Distanzen und Richtungen leicht zu erhalten und gut interpretierbar. Karten dagegen sind zwar auch leicht zu erhalten und liefern viele Informationen, sind aber häufig schwierig zu interpretieren, da gerade das Zeichnen von Karten auch von künstlerischen Fähigkeiten, Kultur und sozialem Status bzw. Vorbildung beeinflußt wird (Evans, 1980). Dabei stellt sich die Frage, ob diese Untersuchungen tatsächlich dieselben Repräsentationen abfragen, die auch bei der Navigation selbst verwendet werden bzw. inwiefern die Ergebnisse für das natürliche Navigationsverhalten relevant sind. Zum Teil werden aber auch in der Psychologie Leistungen bei Navigationsaufgaben oder Finden von Abkürzungen untersucht. Als Maße dienen häufig die Anzahl der Fehler an Entscheidungspunkten, die Weglänge oder die Zeit, die für einen Weg gebraucht wird. Das abgefragte räumliche Wissen kann auf unterschiedliche Weise erworben worden sein: einerseits durch Interaktion mit der realen Welt - sei es im Alltag oder im Rahmen des Versuches -, andererseits durch Präsentation von Diaserien, Videofilmen oder das Lernen von Karten oder Modellen. Teilweise wurden auch Versuche direkt in der realen Welt durchgeführt; dabei wurden Klassenzimmer, Schulen, Campusgelände oder auch Innenstädte und Wohngebiete als natürliche Umgebung genutzt.

2.8.2 Virtuelle Umgebungen

Psychophysische Versuche im Labor haben meist den Nachteil, daß sie keine realistischen Reize oder Möglichkeit zur Interaktion bieten. Versuche in der realen Welt lassen sich dagegen schlecht kontrollieren. Einen Ausweg bieten Versuche in virtuellen Umgebungen.
Die Verwendung von virtuellen Umgebungen ist ein sehr neues, erst in den letzten Jahren entwickeltes Versuchsparadigma. Möglich wurde der Einsatz dieser Methode durch die große Verbreitung und Weiterentwicklung von Computern, insbesondere von Hochleistungs-Grafikrechnern.

Der Einsatz von virtuellen Umgebungen hat folgende grundlegende Vorteile:

- genaue Kontrolle von Versuchsbedingungen
- einfache und schnelle Manipulation von Umgebungen
- Interaktives Verhalten von Versuchspersonen in der (virtuellen) Umgebung
- komplexe, realitätsnahe Umwelten

Auf diese grundlegenden Vorteile soll weiter unten noch genauer eingegangen werden. Ein weiterer Vorteil ist, daß Leistungen relativ einfach zu messen sind. So können "Bewegungen" oder andere Aktionen der Versuchspersonen und auch Reaktionszeiten direkt gemessen werden. Aufgrund der oben genannten Gesichtspunkte sind virtuelle Umgebungen gut zur Untersuchung menschlichem Verhalten und komplexer Wahrnehmungsleistungen geeignet. Bei rein visuell dargebotenen virtuellen Umgebungen besteht die Möglichkeit, durch gleichzeitig durchgeführte Analyse der Gehirntätigkeit mit bildgebenden Verfahren das Verhalten und die Gehirnfunktion zueinander in Bezug zu setzen (Maguire, 1997).
Virtuelle Umgebungen haben gewissermaßen eine Zwischenstellung zwischen "klassischem" Laborversuch und realer Welt. Im Vergleich bietet der Laborversuch die beste Kontrollierbarkeit und Versuche in der realen Welt den höchsten Realismus. Virtuelle Umgebungen sind in keinem einzelnen genannten Punkt führend. Ihr Vorteil liegt jedoch darin, daß sie zugleich gute Interaktivität, Kontrolle und Manipulation der Versuchsbedingung und einen hohen Grad

an Realismus bieten. Sie können daher als Ergänzung zu herkömmlichen Methoden genutzt werden.
Verschiedene virtuelle Welten können aber sehr unterschiedlich aussehen. Sie können sich generell vor allem in ihrer Komplexität, dem Grad der Interaktivität und der Art der vorhandenen Informationsquellen unterscheiden.

Die **Kontrollierbarkeit** des Versuches ist unter Laborbedingungen und auch in der virtuellen Welt gut, jedoch nicht in der realen Welt. Dort können z.B. Sonnenstand und Wetterverhältnisse variieren. Mit der Kontrollierbarkeit ist auch die Wiederholbarkeit gewährleistet, d.h. Ergebnisse sind reproduzierbar. Manipulationen (s.u.) in einer virtuellen Umgebung sind ebenfalls kontrollierbar.

Virtuelle Umgebungen zeichnen sich durch **Manipulierbarkeit** in vielerlei Weise aus. Einerseits können die virtuellen Umgebungen selbst verändert werden, andererseits können unterschiedliche Simulationsanlagen benutzt bzw. Ein- und Ausgabeeinheiten variiert werden. In letzerem Fall kann zwischen verschiedenen Interfaces zur Eingabe der Interaktionen der Versuchspersonen mit der virtuellen Umgebung - z.B. Maus oder Joystick - oder verschiedenen Ausgabeeinheiten der Umgebung verglichen werden. Durch gezielte Variation von Ein- und Ausgabeeinheiten kann die Integration von Information aus verschiedenen Sinnesmodalitäten bzw. der Beitrag einzelner Sinnesmodalitäten untersucht werden. Außerdem kann der Frage nachgegangen werden, welche Informationsquellen benötigt werden bzw. ausreichend sind für ein korrektes Ausführen der jeweiligen Aufgabe. So kann die virtuelle Umgebung über einen Computer-Bildschirm, eine Projektionsleinwand oder einen Head-Mounted-Display als Ausgabeeinheit dargeboten werden. Dabei verändert sich einerseits die Größe des visuellen Feldes, andererseits auch die angesprochenen Sinnesmodalitäten. Durch Verwendung eines Head-mounted-Displays und eines zusätzlichen Geräts zur Verfolgung der Kopfbewegungen der Versuchsperson (z.B. Polhemus) kann der Bildausschnitt in Abhängigkeit von der Blickrichtung verändert werden; somit können auch vestibuläre Reize wirksam werden (Péruch und Gaunet, eingereicht). Welche Eingabegeräte benutzt werden, hat einen Einfluß auf die Ergebnisse (Henry, 1992).
Eine andere Form der Manipulation ist das Anbieten zusätzlicher Hilfsmittel wie Karten oder Kompasse. Man kann dabei in Abhängigkeit von den angebotenen Hilfsmitteln Veränderungen der Strategie beobachten. Außerdem können sie eine Desorientiertheit der Versuchspersonen verringern, andererseits aber auch von der eigentlichen Aufgabe ablenkend wirken. So zeigten sich bei Versuchen von Darken und Sibert (1996) bessere Leistung in bestimmten Suchaufgaben durch zusätzlich eingeblendete Karten oder Gitterstrukturen, die auf geringere Desorientiertheit der Versuchspersonen oder verbesserte Strategien durch diese Hilfsmittel zurückgeführt werden konnten. In anderen Fällen hatten Karten während der Exploration zum Teil einen negativen Effekt auf das Schätzen von Richtungen, halfen jedoch bei anderen Aufgaben (Satalich, 1995). In Experimenten von Ruddle et al. (1997) in einem virtuellen Gebäude mit oder ohne säulenförmige Landmarken gaben die Versuchspersonen zwar an, in den beiden verschiedenen Situationen verschiedene Strategien benutzt zu haben, auf die gezeigte Leistung hatte dies jedoch keinen Effekt. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch in der realen Welt bei einem Vergleich von Navigationsleistungen in Gegenwart von natürlichen oder künstlichen Landmarken (Heft, 1979). Auch außerhalb von virtuellen Umgebungen können in gewissem Umfang sensorische Informationsquellen und Hilfsmittel variiert werden. So können Versuche mit Versuchspersonen durchgeführt werden, die blind sind oder denen die Augen verbunden werden; ihnen sind also nur propriozeptive Informationen zugänglich (z.B. Loomis et al., 1993). Bei einer großen Anzahl anderer Labor-Experimente wird dagegen nur

visuelle Informationen geboten. Lernen, Testen oder beides kann durch Betrachten von Diaserien, Videos oder über den Computerbildschirm geschehen. Gleichzeitig verändern diese Mittel aber auch der Grad an Interaktivität, so daß Aussagen über die Rolle von sensorischen Informationskanälen nur eingeschränkt gemacht werden können.
Eine weitere Möglichkeit zur Manipulation von virtuellen Umgebungen ist die Veränderung der simulierten Umgebung selbst. Dies ist in virtuellen Umgebungen schnell und gezielt durchführbar, während dies in der realen Welt nur schlecht möglich oder ganz unmöglich ist. So können in einer virtuellen Stadt z.B. Gebäude vertauscht oder die Sichtbarkeit verändert werden (Gillner und Mallot, 1998; Aginsky, 1996). Mit den Auswirkungen auf das Verhalten kann untersucht werden, welche Informationen zum Ausführen der jeweiligen Aufgabe wichtig sind. Aus dem Verhalten bzw. den Leistungen der Versuchspersonen können auch Rückschlüsse auf die verwendeten Strategien gezogen werden.
Außerdem können auch unterschiedliche Lern- und Testumgebungen benutzt werden. Dies kann einerseits eine Manipulation der virtuellen Umgebung selbst sein, wie die oben beschriebene Vertauschung von Gebäuden. Andererseits kann die Lernphase in der realen Welt stattfinden und die erworbenen Kenntnisse anschließend in einer virtuellen Umgebung getestet werden oder umgekehrt. Dies sagt etwas über den Transfer von Leistungen von einer Umgebung in die andere aus und somit auch über die Ähnlichkeit der Umgebungen in bezug auf verhaltensrelevante Informationen.

Die **Interaktivität** kann in virtuellen Umgebungen gezielt verändert werden (Satalich, 1995). Dabei läßt sich aber keine allgemeingültige Aussage darüber treffen, ob eine größere Interaktivität die im Versuch gezeigten Leistungen verbessert oder verschlechtert. Vielmehr scheint es so zu sein, daß Interaktivität abhängig von der jeweiligen Aufgabe und Umgebung entweder steigernd oder beeinträchtigend auf die Leistung wirken kann (Überblick in Péruch und Gaunet, eingereicht). Generell kann man zwischen verschiedenes Grades der Interaktivität unterscheiden. Dazu gehört das Vorspielen einer im voraus aufgenommenen Route. Dies kann ganz ohne Interaktion erfolgen und ist dann dem Vorspielen eines Videos gleichzusetzen. Teilweise besteht für die Versuchsperson die Möglichkeit zu freien Kopfdrehungen, ähnlich wie bei einem Beifahrer im Auto (Satalich, 1995). Einen höheren Grad der Interaktivität weist das aktive Folgen eines vorgegebenen Weges auf. Der Weg kann z.B. durch mündliche Instruktionen des Experimentators (Aginsky, 1996) vorgegeben werden, auf dem Boden des virtuellen Raums markiert sein (Satalich, 1995) oder durch Folgen eines "virtuellen Führers" umgesetzt werden. Den höchsten Interaktivitätsgrad weist die selbständige, freie Exploration auf. Die aktive Bewegung in der virtuellen Umgebung kann unterschiedlich umgesetzt werden. Dabei bedingt die Art des Eingabegeräts zum Teil auch die Bewegungsart. So kann mit Hilfe eines Head-Mounted-Displays und eines Positionserfassungs-Systems die visuelle Darstellung den Rotations- und Translationsbewegungen der Versuchsperson angepaßt werden. Bei Benutzung eines Joysticks sind in der Regel Kraft und Geschwindigkeit gekoppelt; mit Tastatur oder Maus sind sowohl kontinuierliche Bewegungen als auch Bewegungen in diskreten Schritten von Entscheidungspunkt zu Entscheidungspunkt umsetzbar.
Auch außerhalb von virtuellen Welten zeigen sich Unterschiede in passiv und aktiv erworbenem Wissen. Wird ein Weg tatsächlich abgegangen, wird er schneller gelernt als durch das Sehen eines Videofilms der Strecke (Gale et al., 1990). Auch Goldin und Thorndyke (1982) zeigten Unterschiede zwischen Lernen durch eine reale Bustour oder durch Ansehen eines Videofilmes dieser Bustour. Allerdings ist bei diesen beiden Untersuchungen der Einfluß der Interaktivität von dem der Sinnesmodalitäten nicht sauber trennbar.

Im **Unterschied zur realen Welt** geschieht die Interaktion mit virtuellen Welten nicht direkt, sondern über bestimmte Ein- und Ausgabeeinheiten (van Veen et al., 1998; Distler et al., 1997). In der Regel bieten sie auch weniger Information als die reale Welt (weniger Details, einfachere Texturen), und nur eine oder einige wenige Sinnesmodalitäten werden jeweils angesprochen. Visuelle Information wird allgemein als die dominierende Informationsquelle angesehen (Péruch und Gaunet, eingereicht). Die meisten virtuellen Umgebungen werden daher rein visuell dargeboten, wobei das visuelle Feld kleiner ist als unter natürlichen Bedingungen. Auch eine schnelle Veränderung der Blickrichtung ist meist nicht möglich; es gibt kein Äquivalent für einen schnellen Blick über die Schulter. Ein- und Ausgabeeinheiten sollten idealerweise intuitives Handeln ermöglichen. Diese Vorgabe ist nicht immer erfüllt. Auch die Geschwindigkeitswahrnehmung ist gegenüber der realen Welt verändert; Geschwindigkeiten werden als geringer wahrgenommen als sie tatsächlich sind (Distler et al., 1997).
Teilweise kann die Interaktion mit virtuellen Umgebungen zu **Problemen** führen. Dies kann daran liegen, daß die zur Verfügung gestellte Information unzureichend ist oder daß die Art und Weise des Informationsaustausches zu Konflikten führt. Einige Versuchspersonen leiden unter der sogenannten Simulationskrankheit. Die Symptome können von Müdigkeit der Augen über ein Gefühl der Desorientierung bis zu Übelkeit reichen (Potel, 1998). Dabei scheint für die Orientierung das Fehlen von vestibulärer Information bei Rotationen gravierender zu sein als bei Translationen (May und Wartenberg, 1995). Ein anderes Problem im Informationsaustausch kann bei einigen Versuchsapparaturen in einer zeitlichen Verzögerung bei der Aktualisierung der dargestellten Umgebung gegenüber der von der Versuchsperson ausgeführten Bewegungen liegen. Die Veränderung der Umgebung entsprechend der Handlung erfolgt also nicht wirklich in Echtzeit, sondern wird durch verschiedene Verarbeitungsschritte im Computer verzögert.

2.8.3 Vergleichbarkeit von realer Welt und virtuellen Umgebungen

Sorgfältig entworfene und implementierte virtuelle Umgebungen wirken in der Regel relativ realistisch. Es stellt sich aber die Frage: Wie realistisch sind sie wirklich, d.h. lassen sich die Ergebnisse aus der virtuellen Welt auf die reale Welt übertragen?
Falls Ergebnisse aus virtuellen Umgebungen direkt übertragbar sind, dann können in diesen stellvertretend für die reale Welt Versuche gemacht werden, die in jener nicht möglich sind, z.B. die oben genannte Vertauschung von Häusern. Falls sich dagegen Ergebnisse in virtuellen Umgebungen und realer Welt unterscheiden, muß dies jedoch nicht unbedingt als Nachteil verstanden werden. Die zu beantwortende Frage lautet dann, was diesen Unterschied eigentlich ausmacht. Dazu können die Simulationsumgebungen in ihren Ein- und Ausgabeeinheiten und in ihrer Komplexität systematisch verändert werden. Es können auch bewußt "arme" virtuelle Welten zur Untersuchung der Frage eingesetzt werden, wieviel Details zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Leistung nötig sind. Virtuelle Welten können in ihrer Konstruktion auch auf bestimmte Strategien zugeschnitten sein, z.B. die Navigation anhand von Ansichten fördern (Gillner, 1997). Die Leistung aufgrund solcher Strategien kann dann analysiert werden.

Es können auch Vergleiche zwischen anderen Arten von Versuchsumgebungen herangezogen werden, wie die oben angesprochenen Vergleiche zwischen Lernen in der realen Welt, durch Video oder Diaserien. Außerdem kann auch zwischen verschiedenen Meßmethoden verglichen werden, d.h. Methoden, die eine bestimmte Leistung auf verschiedene Weise abfragen. So können z.B. Richtungsschätzungen zwischen zwei Orten durch Zeigen mittels einer Zeiger-Apparatur direkt in der Umwelt erhoben werden oder mit einer solchen Apparatur an an-

derer Stelle (z.B. im Labor), so daß die Richtungen von einem vorgestellten Standort und vorgestellter Orientierung aus geschätzt werden müssen (Thorndyke und Hayes-Roth, 1982); eine weitere Möglichkeit sind Papier-und-Bleistift-Aufgaben, in denen die Richtung des angegebenen Ortes im Verhältnis zu einer anderen vorgegebenen Richtung eingezeichnet werden soll; auch aus Karten oder Modellen lassen sich nachträglich Richtungen zwischen Orten bestimmen. May (1992) verglich mentale Karten, die auf unterschiedliche Weise ermittelt wurden - entweder durch multidimensionale Skalierung von geschätzten Distanzen oder Richtungen zwischen Orten oder direkt durch Modellrekonstruktionen.

Verschiedene Studien zeigten Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede zwischen verschiedenen Versuchsumgebungen auf, seien es virtuelle und reale oder andere Umgebungen. Der Grad der Ähnlichkeit bzw. der Unterschiede zwischen realen und virtuellen Umgebung dürfte dabei auch von den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen virtuellen Umgebung selbst abhängen. Da virtuelle Umgebungen sehr unterschiedlich sein können, sollte man auch nicht von vornherein davon ausgehen, daß sich Ergebnisse von einer virtuellen Umgebung direkt auf eine andere übertragen lassen. Der Vergleich von Ergebnissen bei ähnlichen Experimenten, aber in unterschiedlichen virtuellen Umgebungen kann ebenfalls dazu beitragen, die Mechanismen des Navigationsverhalten oder andere komplexe Wahrnehmungen und Handlungen zu verstehen.

3. Zielsetzung der Diplomarbeit

Diese Arbeit untersucht Richtungsschätzungen von Versuchspersonen in einer realen und einer virtuellen Umgebung. Dabei soll die Richtung von Orten geschätzt werden, die zum Zeitpunkt der jeweiligen Schätzung nicht sichtbar sind. So sind die Versuchspersonen gezwungen für die Schätzung auf die Inhalte der räumlichen Repräsentation zurückzugreifen. Aus den Schätzfehlern sollen Rückschlüsse auf die räumliche Repräsentation des Menschen gezogen werden. Außerdem sollen die Schätzungen in der realen Welt mit denen aus einer entsprechenden virtuellen Umgebung verglichen und in Hinblick auf die Unterschiede zwischen den beiden Umgebungen analysiert werden.
In den folgenden Abschnitten soll auf die Gründe für das Interesse an der Untersuchung der räumlichen Repräsentation, für die Anwendung von Richtungsschätzungen als Paradigma und für das Interesse an einem Vergleich zwischen realer und virtueller Umgebung eingegangen werden.

3.1 Untersuchung der räumlichen Repräsentation

Die räumliche Repräsentation vermittelt zwischen Wahrnehmung der Umwelt und Verhalten und spielt somit eine zentrale Rolle bei der Navigation. Eine vielfach untersuchte, aber noch nicht endgültig geklärte Frage ist, wie die räumliche Repräsentation aussieht bzw. ob es sich überhaupt um eine einzelne Repräsentation oder nicht vielmehr um mehrere, voneinander relativ unabhängige Repräsentationen mit unterschiedlichen Inhalten handelt. Geht man von einer metrischen Repräsentation aus, stellt sich z.B. die Frage, wie korrekt die Schätzungen der Richtungen sind, ob sich Verzerrungen finden und ob sich etwas über deren Ursachen aussagen läßt.
Ein Teil der Versuchspersonen wiederholte den Versuch außer in der virtuellen Umgebung auch in der realen Umgebung. Dies kann als zusätzliche Evidenz dienen, ob möglicherweise gefundene Unterschiede zwischen realer und virtueller Welt tatsächlich auf Effekte der jeweiligen Versuchsumgebung oder eher auf variable Antworten der Versuchspersonen (z.B. durch eine sich verändernde Repräsentation) zurückzuführen sind.

3.2 Zeigen von Richtungen als Paradigma

Die Versuchspersonen sollten Richtung zu bekannten, aber vom jeweiligen Standpunkt aus nicht sichtbaren Orten schätzen. Es gibt mehrere Gründe, aus denen das Zeigen von Richtungen für die beschriebene Fragestellung geeignet ist. Zunächst einmal handelt es sich hierbei um eine etablierte Methode. Dies bedeutet, daß Ergebnisse mit anderen Studien verglichen und in deren Rahmen eingeordnet werden können. Außerdem sind Richtungsschätzungen - zumindest bei ausreichender Vertrautheit mit dem Gelände - präzise genug, um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen einer realen und einer entsprechenden virtuellen Umgebung zu ziehen. Ein weiterer Vorteil ist, daß mit dem Richtungsfehler eine gut definierte, quantitativ meßbare und gut interpretierbare Größe vorhanden ist.
Zudem bestanden auch Einschränkungen in bezug auf die virtuelle Umgebung. In dieser konnte nicht frei navigiert, sondern nur Rotationen ausgeführt werden. Das Zeigen von Richtungen ist für Versuche in dieser virtuellen Umgebung insofern geeignet, als daß es von einem Standort ausschließlich durch rotatorische Bewegungen abgefragt werden kann, ohne Translation von Standort zu Standort.
Es stellt sich allerdings die Frage, inwieweit die hier abgefragte Größe für den Wahrnehmungs-Handlungs-Kreislauf der Navigation relevant ist, d.h. inwieweit das Schätzen von Richtungen für die Interaktion mit der Umwelt wichtig ist. Das Schätzen von Richtungen wird vielleicht nicht ständig für unsere täglichen Navigationsaufgaben genutzt, bildet aber dennoch einen Teil unserer räumlichen Kompetenz. Es könnte eine Bedeutung beim Erklären von Wegen haben - dies wird häufig vom Zeigen der ungefähren Richtung des Ziels begleitet - oder beim Finden von Abkürzungen, wenn auch andere Mechanismen zu dieser Aufgabe beitragen können. Vielleicht ist das Wissen über Richtungen zu anderen Orten in der Umgebung auch wichtig für das Gefühl, in der Umgebung orientiert zu sein. Zumindest scheinen Menschen, die nach eigener Einschätzung einen guten Orientierungssinn besitzen, Richtungen korrekter einschätzen zu können (Kozlowski und Bryant, 1977).

3.3 Vergleiche zwischen realer und virtueller Umgebung

Wie im vorigen Kapitel schon beschrieben, sind virtuelle Umgebungen aufgrund ihres hohen Grades an Realismus, ihrer Interaktivität, Manipulierbarkeit und Kontrollierbarkeit interessante Versuchsplattformen zur Untersuchung von Verhalten und von komplexen Wahrnehmungsleistungen. Eine besondere Bedeutung käme Ergebnissen aus virtuellen Umgebungen zu, wenn sich diese direkt auf die reale Welt übertragen ließen. Ob eine solche Übertragbarkeit tatsächlich vorhanden ist, muß aber zunächst getestet werden. Die hier ausgeführten Versuche sollen ein Ansatz sein, diese Frage zu beantworten.
Um diese Frage zu klären, kann man in einer Reihe von Experimenten in verschiedenen virtuellen und realen Umgebungen die Leistungen bei verschiedenen Aufgaben vergleichen. Dabei kann einerseits der Wissenstransfer von einer Umgebung in die andere untersucht werden oder das Verhalten bzw. die Leistungen in den beiden Umgebungen einander gegenübergestellt werden. In den hier durchgeführten Experimenten fand das Lernen in der realen Welt statt. Die Leistungen der Versuchspersonen wurden sowohl in der realen als auch in der virtuellen Umgebung abgefragt. Das umgekehrte Experiment mit der Lernphase in der virtuellen Modell von Tübingen könnte eine mögliche Fortführung der Untersuchung dieser Fragestellung sein, ist aber kein Teil dieser Arbeit.

Es gibt bereits eine Reihe von Experimenten, die Ergebnisse von Versuchen in realer und virtueller Umgebung vergleichen oder einen direkten Transfer zwischen beiden Umgebungen untersuchen. Dabei wurden sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede zwischen den Umgebungen gefunden. Es ist aber zu berücksichtigen, daß dasselbe auch für Vergleiche zwischen zwei unterschiedlichen virtuellen Umgebungen (Allen und Singer, 1997; Singer et al., 1997) oder einer speziellen virtuellen Umgebung gelten kann, die unter verschiedenen Interaktionsbedingungen bzw. mit verschiedenen Ein- und Ausgabeeinheiten dargeboten wird (Henry, 1992). Ruddle et al. (1997) modellierten eine virtuelle Umgebung nach einer realen Versuchsumgebung von Thorndyke und Hayes-Roth (1982) und führten darin vergleichbare Experimente durch. In beiden Studien fanden sich ähnliche Resultate beim Schätzen von Distanzen und Richtungen, wobei die Fehler in der virtuellen Umgebung aber insgesamt größer waren.

Generell scheinen Versuchspersonen in virtuellen Umgebungen häufig zunächst leicht desorientiert zu sein. Unter diesem Gesichtspunkt kann man mit dem hier durchgeführten Vergleich zwischen realer und virtueller Umgebung die Frage stellen, ob nur der Erwerb eines Orientierungsgefühls in virtuellen Umgebungen erschwert ist oder ob sogar die hier verwendete, hoch fotorealistische virtuelle Umgebung selbst einen desorientierenden Effekt während der Abfrage des in der realen Umgebung erworbenen Wissens hat.

4. Materialien und Methoden

Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, Richtungen von gut bekannten, vom gegenwärtigen Standort aus aber nicht sichtbaren Orten zu schätzen. Die Versuche wurden in zwei verschiedenen Umgebungen durchgeführt: zunächst in der realen Welt, darauf in einer virtuellen Version derselben Umgebung. Zunächst sollen Angaben zu den Versuchspersonen gemacht und die bei den Versuche in der realen Welt verwendeten Materialien und Methoden genauer beschrieben werden, danach soll auf jene für die Versuche in der virtuellen Umgebung eingegangen werden.

4.1 Versuchspersonen

An den Versuchen nahmen zehn Versuchspersonen (fünf weiblich, fünf männlich) teil, die im Durchschnitt 26,8 Jahre (22 bis 31 Jahre) alt waren. Es handelte sich dabei um Studenten der Universität Tübingen, die für die Teilname am Versuch bezahlt wurden, oder Angestellte des Max-Planck-Instituts für biologische Kybernetik. Alle Versuchspersonen kannten sich in Tübingen gut aus; sie wohnten dort seit 2 bis 16 Jahren (im Mittel seit 6 Jahren). Vier der Versuchspersonen wiederholten die Versuche in der realen Welt nach 4-12 Wochen. Alle Versuchspersonen führten die Versuche sowohl zuerst in der realen als auch später in der virtuellen Umgebung durch. In der realen Welt dauerte der Versuch (bei verschiedenen Versuchspersonen) zwischen 2 und 3 Stunden. Für die Durchführung des Versuchs in der virtuellen Welt benötigten die Versuchspersonen zwischen einer und zwei Stunden.

4.2 Versuche in der realen Welt

4.2.1 Materialien

Richtungsschätzungen können generell mit verschiedenen Methoden erhalten werden, wobei im allgemeinen nur Richtungsschätzungen zu Objekten oder Orten durchgeführt werden, die von dem jeweiligen Standort aus nicht sichtbar sind. Dabei kann ein frei drehbarer Zeiger benutzt werden, der in die vermutete Richtung eines genannten Ortes gedreht werden soll. Dabei bietet es sich an, die gewählte Richtung von einem Kompaß abzulesen. Richtungsschätzungen mit einem Zeiger können einerseits in der natürlichen Umgebung geschehen; dabei sind dann der tatsächliche Standort und Orientierung mit denen identisch, von denen aus

die Richtungsschätzung vorgenommen werden sollen. Andererseits kann der Versuch auch außerhalb der abgefragten Umgebung (z.B. im Labor) durchgeführt werden, so daß sich die Versuchsperson den Standort und die eingenommene Orientierung, von denen aus geschätzt werden soll, vorstellen muß. Eine andere Möglichkeit ist die sogenannte Papier-und-Bleistift-Methode. Auf einem Blatt Papier stellt das Zentrum eines Kreises einen bestimmten Ort als die Position der Versuchsperson dar. Auf dem Kreis ist die Richtung eines Referenzpunktes eingetragen. Der getestete Ort soll nun in der korrekten Richtung im Verhältnis zur Referenzrichtung auf dem Kreis markiert werden. Hierbei wird also eigentlich der Winkel zwischen zwei Orten geschätzt.
Da die hier vorgenommenen Experimente den Einfluß der jeweiligen Umgebung untersuchen sollen, wurde eine Zeige-Apparatur zum Ausführen der Schätzungen gewählt, da der direkte Einfluß der Umwelt auf die gezeigten Richtungen gut erfaßbar ist.

Die in der Tübinger Innenstadt gezeigten Richtungen wurden mittels eines Kompasses (Brunton 5008 Pocket Transit Compass) gemessen. Die Kompaßskala war in 1°-Markierungen unterteilt; beim Ablesen wurde auf die nächsten 0.5° geschätzt. Der Kompaß war auf einem antimagnetischen Stativ und Stativhalter befestigt. Durch den Stativhalter konnte der Kompaß waagerecht ausgerichtet werden; dies gewährleistet eine korrekte Ablesbarkeit des Kompasses. Gleichzeitig konnte der Kompaß auf dem Stativhalter frei gedreht werden. Fest am Kompaß war ein ca. 20 cm langer weißer Plastikzeiger befestigt (Abb. 1). Der Zeiger sollte in die Richtung gedreht werden, in der ein bestimmter, vom Experimentator genannter Ort von der Versuchsperson vermutet wurde. Der Kompaß wurde bei Drehung des Zeigers mitgedreht, d.h. die 0°-Markierung der Kompaßskala blieb dabei immer genau in der Richtung des Zeigers. Dadurch war es möglich, die gezeigte Richtung direkt vom Kompaß abzulesen. Die Kompaßnadel und -skala waren normalerweise verdeckt und konnten somit von den Versuchspersonen nicht gesehen werden. Nur zum schriftlichen Festhalten der gezeigten Richtung wurde die Verdeckung kurzzeitig durch den Experimentator aufgehoben.
Korrekte Richtungen wurden von Katasterplänen der Innenstadt (Stand 1976) im Maßstab 1:500 abgelesen. Alle Werte wurden mindestens zweimal abgelesen. Außerdem wurde die Differenz zwischen Hin- und Rückrichtung berechnet, um die Richtigkeit der abgelesenen Werte abzusichern. Die resultierende Genauigkeit bei der Bestimmung der korrekten Richtung ist besser als 0.5°.
Zusätzlich wurden Messungen mit dem Kompaß an den potentiellen Meßorten durchgeführt, um sicherzustellen, daß es an diesen keine lokalen Abweichungen vom allgemeinen Magnetfeld gab. Dazu wurde die Kompaßrichtung von mindestens drei sichtbaren, lokalen Peilpunk-

Abbildung 1: Zeige-Apparatur. Die Versuchsperson konnte den am abgedeckten Kompaß befestigten Zeiger frei drehen. Bei der Drehung des Zeigers bewegten sich die Versuchspersonen ebenfalls um die Meßapparatur herum, so daß Augen und Zeiger immer auf einer Linie lagen.

ten (wie Hausecken etc.) bestimmt und diese Richtung mit dem durch die Karte ermittelten Wert verglichen. Dabei lag der Unterschied zwischen der Ausrichtung der Kompaßnadel und der von der Karte ermittelten Werte um 1° oder darunter.

4.2.2 Versuchsdurchführung in der realen Welt (Tübinger Innenstadt)

Die Tübinger Innenstadt mit einer Fläche von ungefähr 600x400 m wurde als Versuchsumgebung für die Experimente gewählt. Durch Befragung von etwa 15 Angestellten des Instituts, davon 8 in Tübingen wohnend, wurden anhand eines Fragebogen elf gut bekannte Orte in der Innenstadt herausgesucht. Es wurden folgende Orte ausgewählt (Abb. 2): Lustnauer Tor, Nonnenhaus, Arsenal, Johanneskirche, Krumme Brücke, Jakobuskirche, Haagtor, Schloß, Marktplatz, Holzmarkt und Post. Bei größerer Vertrautheit mit einem Ort wird das Zeigen von Richtungen korrekter (Thorndyke und Hayes-Roth, 1982). Bei einem Vergleich zwischen zwei Umgebungen sind daher relativ gut bekannte Orte als Grundlage für die Schätzungen ratsam, da so auch möglicherweise kleine Unterschiede zwischen realer und virtueller Umgebung nachgewiesen werden können, die bei einem größeren Ausgangsfehler in den allgemeinen Schwankungen der Fehler verschwinden würden.

Den Versuchspersonen wurden zu Beginn des Versuches Fotos der einzelnen Orte gezeigt, um sicherzustellen, daß diese ihnen bekannt waren. Außerdem wurden dadurch die Orte, deren Richtung die Versuchspersonen schätzen sollten, präzisiert. Beim Zeigen von Richtungen innerhalb der Innenstadt sind die oben genannten Ortsangaben (wie Lustnauer Tor) nicht genau genug; diese Ortsbezeichnungen sind von den anderen Orten aus teilweise über einen Winkel von mehr als 10° zutreffend. Auf den Fotos wurde der genaue Ort, zu dem

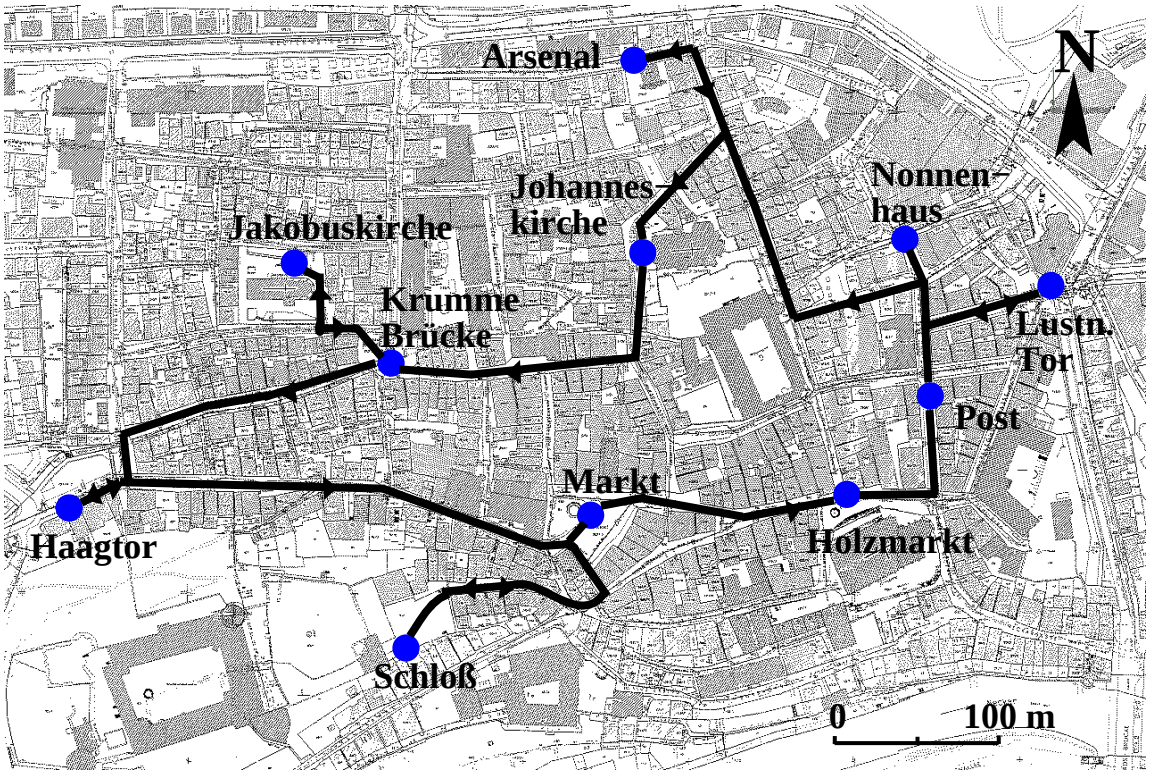

Abb. 2: Karte der Innenstadt Tübingens. Die gelaufene Route ist als schwarze Linie eingezeichnet; Punkte geben die Standorte an, von bzw. zu denen Richtungsschätzungen gemacht werden sollten (genauere Angabe der Orte siehe Anhang B.2, Abb. 26-36).

gezeigt werden sollte, durch die im Versuch verwendete Zeigeapparatur mit einer dahinterstehenden Person kenntlich gemacht.
Richtungsangaben sollten von nacheinander allen oben genannten Orten zu den jeweils übrigen Orten gemacht werden (genaue Anweisungen an die Versuchspersonen siehe Anhang A). Vom Marktplatz aus sollten z.B. die Richtungen aller anderen oben genannten Orte geschätzt werden (Lustnauer Tor, Schloß usw.), vom Lustnauer Tor wiederum die Richtung von Marktplatz, Schloß usw. Die Versuchspersonen wurden auf einer bestimmten Route durch Tübingen geführt (Abb. 2) und machten von den einzelnen Stationen der Route dann die beschriebenen Richtungsschätzungen. Aus Zeitgründen wurde eine Route gewählt, bei der die Wege zwischen den Landmarken möglichst kurz waren; um systematische Fehler durch eine bestimmte Reihenfolge zu vermeiden, wurden jedoch die Startpunkte und die Richtung, in der die Route abgelaufen wurde, variiert (Anhang B.1). Die Reihenfolge, in der die Richtungen zu den anderen Standorten geschätzt werden sollte, wurde dabei vom Versuchsleiter vorgegeben. Sie war für eine bestimmte Versuchsperson an allen Standorten gleich, variierte aber zwischen verschiedenen Versuchspersonen, um dabei Effekte der Reihenfolge ebenfalls möglichst auszuschließen.

Die verschiedenen Standorte wurden möglichst so ausgewählt, daß die jeweils anderen Orte von diesem nicht sichtbar waren. An einigen Standorten waren jedoch ein oder zwei der anderen Orte sichtbar. In diesen Fällen wurden diese von den Schätzungen ausgeschlossen, d.h. die entsprechenden Richtungen wurden von den Versuchspersonen nicht gezeigt. Die Versuchspersonen führten den Versuch einzeln, nur vom Experimentator begleitet durch. Für die Richtungsschätzungen wurde kein bestimmtes Zeitlimit gesetzt. Einige Versuchspersonen überlegten - insbesondere zu Beginn des Versuches - aber relativ lange. Dabei schwankten sie in ihrer Schätzung meist innerhalb eines bestimmten kleinen Bereiches. In diesen Fällen - bei mehr als etwa 20 min Aufenthalt pro Standort - wurden die Versuchspersonen ermuntert, ihren Entscheidungen zu vertrauen bzw. den Mut zu haben, sich einfach auf eine bestimmte Richtung festzulegen.

4.2.3 Fragebogen

Nachdem die Richtungsschätzungen in der Innenstadt beendet worden waren, wurde den Versuchspersonen ein Fragebogen vorgelegt (Anhang C). In diesem sollten sie Angaben zur Person wie Geschlecht, Alter und Beruf bzw. Studienrichtung machen. Außerdem wurden Fragen gestellt, die in Zusammenhang mit der Kenntnis der Tübinger Innenstadt stehen, z.B. Wohndauer in Tübingen oder Häufigkeit, mit der die für die Schätzungen benutzten Orte aufgesucht wurden. Die Versuchspersonen wurden auch noch um eine Eigeneinschätzung ihres Orientierungssinns gebeten und nach der Häufigkeit der Benutzung einer Karte von Tübingen und den Strategien befragt, die sie im Versuch zur Lösung der Aufgabe verwendet hatten.

4.3 Versuche in der virtuellen Umgebung

4.3.1 Kurzfassung

Die oben beschriebenen Schätzungen wurden in einer virtuellen Umgebung in ähnlicher Weise wiederholt. Dabei wurde ein Bild der Umgebung auf einer halbzylindrischen Leinwand mit 7 m Durchmesser und 3.13 m Höhe dargeboten. Das projizierte Bild nahm dabei ein visuelles Feld von 180° horizontal und 47.9° vertikal ein. Panoramafotos von denselben elf Orten, an

denen in der realen Umgebungen Richtungen geschätzt worden waren, dienten als Textur für ein Zylindermodell (virtuelle Umgebung). Die Maße des Zylinders und der simulierte Blickpunkt wurden so gewählt, daß ein unverzerrtes Bild der Umgebung auf der Leinwand entstand. Die Versuchspersonen rotierten dieses Bild auf der Leinwand mit Hilfe von vier verschiedenen Tasten der Computertastatur, bis die geschätzte Richtung genau voraus lag. Die Vorausrichtung war dabei durch einen roten Strich markiert. Diese Art von Simulationsumgebung wurde gewählt, weil sie einigermaßen schnell realisierbar ist und einen hohen Grad an Realismus aufweist. In der nahen Zukunft wird ein komplettes 3D-Model der Innenstadt (Virtuelles Tübingen) verfügbar sein, das eine komplexere Interaktion mit der Umgebung erlauben wird (van Veen et al., 1998).

Zur Durchführung des Versuches wurden ein eigenes Programm erstellt. Dabei wurde kommerzielle Modellierungs- und Programmierungssoftware kombiniert mit teilweise selbst programmierten Programmteilen und von andern Mitgliedern der Arbeitsgruppe für andere Zwecke programmierte, allgemein verfügbare Routinen in der Programmiersprache C.

4.3.2 Simulationsumgebung

Als Grundmaterial für die **Texturen** wurden mit einer Panoramakamera (Seitz Roundshot 220 VR) Farbdias (Agfa 120er bzw. 220er Rollfilm, DIN 100) an denselben Orten aufgenommen, an den vorher die Messungen durchgeführt worden waren (Anhang B.3). Dazu wurde eine Linse mit einer Brennweite von 24 mm verwendet, so daß sich ein vertikaler Bildwinkel von etwa 80° ergab. Bei der Aufnahme dreht sich die Kamera, während gleichzeitig der Film an der Linse vorbeitransportiert wird; auf diese Weise treten bei dem aufgenommenen Bild am Rand keine Verzerrungen auf. Die Kamera (bzw. deren Linse) befand sich dabei auf einer Höhe von etwa 1.70 m. Die Fotos wurden mit hoher Auflösung digitalisiert und danach mit Bildverarbeitungsprogrammen nachbearbeitet, so daß eventuell vorhandene Farb- oder Helligkeitsunterschiede an beiden Enden des Photos oder zwischen verschiedenen Bildern ausgeglichen wurden und das bearbeitete Bild genau 360° der Originalumgebung wiedergab, d.h. die Enden des Bildes direkt aneinander anschlossen.

Die **Modelle** von Zylindern wurde mit dem Modellierprogramm Medit (Version 2.0g) erstellt. Die digitalisierten Fotos wurden als Texturen für diese Zylindermodelle verwendet. Die Höhe und der Durchmesser der Zylinder wurden so gewählt, daß das ursprüngliche Höhen-Breiten-Verhältnis der Fotos jeweils erhalten blieb. Betrachtet man die Wand dieses texturierten Zylinders von dessen Mittelpunkt aus, sieht man ein unverzerrtes Bild der Umwelt (Abb. 3).

Bei der Programmierung wurde das Programm **Vega** (Version 3.1.2) von Paradigm Simulation Inc. zu Hilfe genommen. Bei Vega handelt es sich um eine Kombination von C-Bibliotheken und einer "Visual Programming"-Schnittstelle. Das Programm baut auf der Programmiersprache C++ und deren Bibliotheksroutinen, OpenGL und Performer von Silicon Graphics Inc. auf und vereinfacht die Programmierung von interaktiver Computergrafik. Vega wurde u.a. zum Einladen der Modelle, zur Definition der Beobachter-Blickpunkten und der Sichtpyramide benutzt. Teilweise kann dies mit Vegas Benutzeroberfläche LynX durch einfaches Selektieren aus Menüs oder Eingabe einiger weniger Parameter in bestimmten, definierten Funktionen geschehen. Der Beobachter-Blickpunkt wurde so gewählt, daß die ursprüngliche Kamerahöhe, also die Mitte des Bildes, der späteren Augenhöhe der Versuchsperson entsprach. Dadurch hatte die Versuchsperson dann vor der Leinwand sitzend denselben Blick-

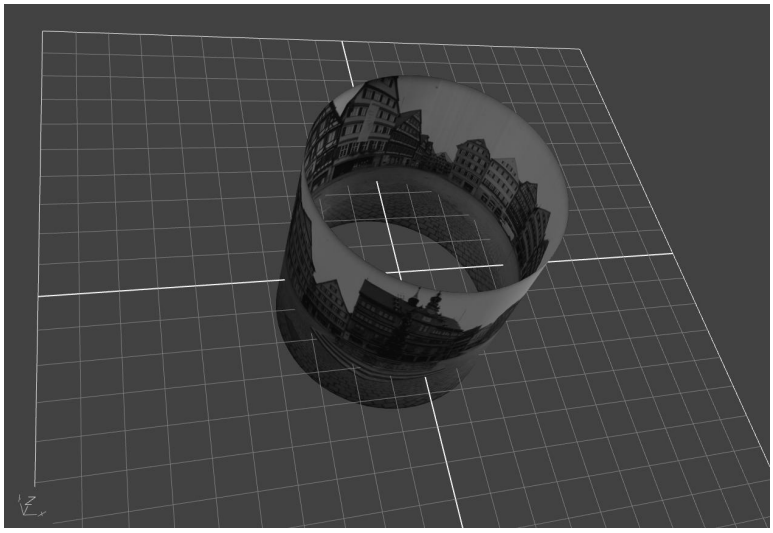

Abb. 3: Texturiertes Zylindermodell. Der simulierte Blickpunkt liegt auf der Längsachse des Zylinders.

punkt wie stehend in der realen Umgebung. Dies erschien unter den gegebenen Umständen als die angemessenste Darstellungsweise. Die Projektoren sind so justiert, daß das Bild auf der Leinwand bei einer Augenhöhe von 1.25 m, also im Sitzen, unverzerrt zu sehen ist; es wäre also nicht sinnvoll, den Versuch im Stehen durchzuführen. Andererseits scheint es der realen Situation ähnlicher zu sein, eine normalerweise beim Stehen eingenommene Blickhöhe im Sitzen präsentiert zu bekommen - wie dies ja auch beim Fahrrad- oder Autofahren geschieht - als ein Bild in 1.25 m Höhe aufzunehmen, d.h. den Versuchspersonen den Blickpunkt eines Kindes zu geben. Mit Hilfe einer Vega-Funktion konnte auch die aktuelle Geradeausrichtung (in 0° bis 360°) registriert werden. Durch Drücken der Leertaste konnte diese abgespeichert werden. Die Modelle waren dabei so ausgerichtet, daß ihre 0°-Richtung der Nordrichtung in der realen Welt entsprach.

Die Versuchspersonen konnten das Bild auf der Leinwand mit vier Tasten der Zahlentastatur auf der rechten Seite des Computerkeyboards bewegen. Das **Bewegungsmodell** wurde über das Modul "Clarus Interactive" innerhalb des Vega-Interfaces definiert. Mit den Tasten "4" und "6" der Zahlentastatur wurde das Bild in einem 10°-Sprung nach links bzw. nach rechts gedreht. Mit den Tasten "7" und "9" wurden Sprünge um 0.25° nach links bzw. nach rechts ausgeführt. Bei anhaltendem Drücken dieser Tasten ging die Bewegung in eine kontinuierlich erscheinende Drehung über. In Vorversuchen mit mehreren Versuchspersonen wurden informell mehrere Alternativen geprüft. In einer Version wurden sowohl ein bewegbares Bild als auch ein bewegbarer Zeiger (eine rote Linie) verwendet. Dabei rotierten die Versuchspersonen zunächst das Bild der Umgebung, bis der Ausschnitt des Bildes, in dessen Richtung die Landmarke lag, auf der Leinwand sichtbar wurde, und bewegten dann nur den Zeiger, bis dieser genau in die geschätzte Richtung zeigte. Dies wurde als nicht besonders komfortabel empfunden, da der Zeiger zur Seite bewegt wurde und sich somit nicht mehr in der normalen Blickrichtung befand; für darauffolgende Schätzungen wurde eine zentrale Position des Zeigers aber als besser bewertet. Andere Alternativen waren verschiedene Drehgeschwindigkeiten und verschieden große Sprünge. Dabei bergen hohe, kontinuierliche Drehgeschwindigkeiten die Gefahr, daß Versuchspersonen Unwohlsein oder Übelkeit empfinden, langsame dagegen bedeuten einen Zeitverlust während des Versuches und können auch zu Ungeduld und möglicherweise Unlust bei der Versuchsperson führen. Bei kleinen Sprüngen gilt dasselbe wie bei niedrigen Drehgeschwindigkeiten. Bei großen Sprüngen besteht dagegen die Gefahr des Orientierungsverlusts. Außerdem ist bei letzteren eine Feineinstellung der Richtung nicht möglich. Schließlich wurde die beschriebene Form der Bewegung ausgewählt, da durch die

10°-Sprünge einerseits eine schnelle Bewegung mit geringem Risiko der Desorientiertheit oder Übelkeit und andererseits durch die zweite, langsame Bewegungsform eine genaue Einstellung der Richtung möglich ist.

Zur **Projektion** wurde eine halbzylinderförmige Leinwand mit 7 m Durchmessern und 3.13 m Höhe verwendet (Abb. 4). Die Versuchsperson saß auf einem Stuhl im Zentrum dieser Leinwand, d.h. sie hatte ein Gesichtsfeld von 180° horizontal und 47.9° vertikal. Die Augenhöhe der sitzenden Versuchsperson lag bei etwa 1.25 m, d.h. 19.7° des präsentierten Bildes lagen im unteren und 28.2° im oberen Bereich des Gesichtsfeldes. Das Bild auf der Leinwand wurde von drei Projektoren (Electrohome Marquee 8000) erzeugt. Für die Berechnungen zur Generierung und Verwaltung der virtuellen Umgebung und zur Kommunikation mit den Ein- und Ausgabeeinheiten diente als Recheneinheit ein Silicon Graphics Onyx2 Infinite-Reality-Grafikrechner mit 3 Grafik-Pipes, 10 Prozessoren und 2.5 GB Hauptspeicher. Je eine Pipe ist dabei auf einen der Projektoren geschaltet. Die an der Decke verankerten Projektoren haben jeweils einen horizontalen Projektionsbereich von 65°. Dabei projiziert der mittlere Projektor ein Bild in die Mitte der Leinwand, die Bilder der anderen Projektoren sind dazu um 57.5° nach links bzw. rechts versetzt (d.h. es gibt einen Überlappungsbereich von 7.5° zwischen den Projektoren). Durch ein Soft-Edge-Blending-System (Panomaker II von Panoram Technologies) wird ein kontinuierliches Bild in diesen Überlappungsbereichen erzielt. Die Projektoren sind so justiert, daß das Bild der virtuellen Umgebung unverzerrt auf der gekrümmten Leinwand erscheint. Sie haben eine Bildauflösung von jeweils 1280x1024 Pixeln und Bilderneuerungsrate von 72 Hz. Ein Pixel entspricht also einem Blickwinkel von etwa 3 Bogenminuten.

Abb. 4: Versuch in der virtuellen Umgebung. Die Versuchspersonen saßen auf einem Stuhl im Zentrum der Leinwand. Die Tastatur, mit der das Bild von der Umgebung bewegt werden sollte, befand sich vor ihnen auf einem Tisch (Bild: Scott Yu).

4.3.3 Versuchsdurchführung in der virtuellen Umgebung

Der Versuch in der virtuellen Umgebung wurde von denselben Versuchspersonen durchgeführt, die auch den Versuch in der realen Welt ausgeführt hatten. Zu Beginn des Versuches wurden ihnen noch einmal dieselben Fotos wie bei Versuchsbeginn in der realen Welt vorgelegt, um die Erinnerung an die genauen, jeweils zu zeigenden Orte aufzufrischen. Alle Versuchspersonen konnten sich mit Hilfe der Fotos an die entsprechenden Orte erinnern. Sie erhielten eine neue Versuchsanleitung, die auf die Bedingungen in der virtuellen Welt abgestimmt war (Anhang A); insbesondere wurden auch die Bewegungsmodi in der virtuellen Umgebung erläutert. Ihre Aufgabe war wieder, von den einzelnen Orten aus in Richtung der angegebenen anderen Orte zu zeigen. Dazu drehten sie das Bild der Umgebung mittels der oben beschriebenen Tasten solange, bis die Position des virtuellen Zeigers mit der geschätzten Richtung des jeweiligen Ortes übereinstimmte. Durch Drücken der Leertaste wurde diese Richtung abgespeichert. Der virtuelle Zeiger war eine am oberen Ende zugespitzte, schmale

rote Linie in Geradeaus-Richtung, die sich vom unteren Rand der Leinwand bis zur Augenhöhe der Versuchsperson erstreckte. Die zu zeigende Richtung wurde als Schrift in der Mitte des Gesichtsfeldes eingeblendet. Der Name des nächsten Orts erschien, nachdem die Versuchsperson durch Drücken der Leertaste in bezug auf die Richtung des vorherigen Orts eine Entscheidung getroffen hatte.
Die Versuchspersonen absolvierten zunächst eine Übungsaufgabe, bei der sie sich mit den Bewegungsmodi vertraut machen konnten und die Richtungen von sechs außerhalb der Tübinger Altstadt gelegenen Orten schätzen sollten. Dazu wurde als Umgebung der Platz benutzt, an dem danach auch der Hauptversuch begann. Nachdem von einem Ort alle Richtungen gezeigt worden waren, wurde direkt der nächste Ort auf der Leinwand dargestellt; es fand also keine Bewegung von einem Ort zum folgenden statt. Die jeweils zuerst gesehene Ausrichtung der Modelle war dabei bezüglich der Kompaßrichtung in der realen Welt randomisiert. Die Reihenfolge der Orte und der zu zeigenden Richtungen von jedem Ort war für die jeweilige Versuchsperson dieselbe wie in der realen Umgebung.

4.4 Auswertung

Es wurden Richtungsfehler und Fehlerbeträge ausgewertet. Der Richtungsfehler soll hier definiert werden als die Differenz zwischen der von der Karte abgelesenen Richtung und der von der Versuchsperson gezeigten Richtung:

Richtungsfehler = korrekte Richtung - gezeigte Richtung.

Negative Fehler weichen von der korrekten Richtung im Uhrzeigersinn ab, positive Fehler dagegen entgegen dem Uhrzeigersinn. Im weiteren soll mit Richtungsfehler (oder einfach Fehler), sofern nichts anderes ausdrücklich angegeben wird, dieser mit einem Vorzeichen behaftete Wert gemeint sein; der aus diesen Daten gebildete Mittelwert wird als mittlerer Fehler oder Mittelwert der Fehler bezeichnet. Die Standardabweichung (SD) der Richtungsfehler ist dabei ein Maß für die Größe der Fehler.
Ein anderes in der Literatur häufig verwendetes Maß für die Größe des Fehlers ist dessen Betrag bzw. der Mittelwert über die Beträge der Richtungsfehler. Im folgenden wird dann vom Fehlerbetrag bzw. beim Mittelwert der Fehlerbeträge (MdFB) gesprochen. Der Mittelwert der Fehlerbeträge ist dabei proportional zur Standardabweichung der vorzeichenbehafteten Fehler. Unter der Voraussetzung, daß die Richtungsfehler einer Gaußschen Verteilung mit dem Mittelwert x=0 angehören, beträgt der Mittelwert der Fehlerbeträge das 0.79fache der SD der Richtungsfehler.

Zur statistischen Auswertung wurden das Programm Mathematica (Version 2.2.2 bis 3.0), die Unixprogramme anova, pair und regress und teilweise auch Microsoft Excel (Version 7.0a) benutzt.

5. Ergebnisse und Diskussionen

5.1 Einführung

Die Versuchspersonen schätzten Richtungen zu Orten, die ihnen zwar bekannt, die aber zu dem jeweiligen Zeitpunkt nicht sichtbar waren. Ziel war eine Analyse der mentalen Repräsentation der Umgebung und ein Vergleich zwischen zwei Testbedingungen, nämlich zwischen den Schätzungen vor Ort und im Labor.
Die Versuche wurden zunächst in der realen Umgebung - in der Tübinger Innenstadt - durchgeführt und später in einer virtuellen Version dieser Umgebung im Labor wiederholt. Dabei wurde die Vorgehensweise in beiden Bedingungen möglichst gleich gestaltet. Unterschiede, die nicht direkt mit den Eigenheiten der beiden Umgebungen zusammenhingen, sollten so gering wie möglich gehalten werden. In mehreren Untersuchungen hatte sich gezeigt, daß mit zunehmender Verweildauer in einer Umgebung Richtungsschätzungen korrekter werden. Bei dem hier geplanten Vergleich zwischen zwei Umgebungen ist eine große Genauigkeit bei den Schätzungen wünschenswert, da so Unterschiede zwischen den Umgebungen so leichter deutlich werden. Daher wurden Versuchspersonen gewählt, die die reale Umgebung seit mindestens zwei Jahren kannten.
Es wurde eine Vielzahl von Schätzungen zwischen Paaren von Orten vorgenommen, um fundierte Aussagen über die Qualität der Repräsentation treffen zu können und eine breite Datenbasis für einen Vergleich zwischen den beiden Umgebungen zur Verfügung zu haben. Ausgewertet wurden die von den Versuchspersonen gemachten Fehler (siehe 4.4).

5.2 Zeigen von Richtungen in der realen Umwelt

5.2.1 Einführung

Durch Auswertung der Richtungsfehler soll an die Frage herangegangen werden, ob die mentale Repräsentation der Umgebung metrisch ist, ob systematische Verzerrungen vorliegen und, falls dies der Fall ist, ob Ursachen für diese gefunden werden können. Außerdem soll untersucht werden, ob oder inwieweit individuelle Unterschiede und Erfahrungen der Versuchspersonen einen Einfluß auf die Richtungsschätzungen haben.

5.2.2 Ergebnisse

- Verteilung der Richtungsfehler

Die Verteilung der Richtungsfehler kann ein Gefühl für die Genauigkeit der Schätzungen vermitteln; wie in Kapitel 3 schon erwähnt, kann die Standardabweichung als deren Maß genommen werden. Interessant ist auch der Schwankungsbereich der Werte. Dem Mittelwert dieser Verteilung kommt schließlich eine besondere Bedeutung zu. Weicht er von 0° ab, liegt entweder ein systematischer Meßfehler vor oder die Versuchspersonen haben beim Zeigen eine bestimmte Vorzugsrichtung. Gegen das Auftreten von Meßfehlern wurden jedoch verschiedene Maßnahmen getroffen (siehe voriges Kapitel). Sollte dennoch eine Abweichung von 0° existieren, muß diese also durch das Verhalten der Versuchspersonen zustande gekommen sein, d.h. die Versuchspersonen haben eine bestimmte Vorzugsrichtung. Abbildung 5 zeigt die Verteilung aller Richtungsfehler. Im folgenden sind bei den allgemeinen Mittelwerten die Werte nicht eingeschlossen, die vier der Versuchspersonen bei der Wiederholung des Versuches in der realen Umgebung produzierten, sofern nichts anderes angegeben ist. Die Fehler befinden sich in einem Bereich von -67.5° bis +63° bei einer Standardabweichung von 14.5° (inklusive der Werte bei Wiederholung des Versuches in der realen Umgebung 14.7°; s. Tab. 5 in bezug auf mittlere Fehler der einzelnen Versuchspersonen). Tatsächlich sind die Schätzungen der Versuchspersonen aber deutlich besser als durch Zufall zu erwarten wäre; die Versuchspersonen machen keine großen Fehler, d.h. auch die größten aufgetretenen Fehler (-67.5° und +63°) sind weit von den theoretisch möglichen ±180° entfernt. Dies ist eine Voraussetzung, die es erlaubt die Daten mit Methoden der Normalstatistik zu analysieren anstatt mit Kreisstatistik, die komplizierter und weniger intuitiv ist. Außerdem ist auch von Bedeutung, welcher Art von Verteilung die Werte angehören. Dies hat ebenfalls Konsequenzen für die verwendbare Statistik und läßt auch gewisse Rückschlüsse auf die Ursachen der Fehler zu. Bei der hier vorhandenen unimodalen und annähernd symmetrischen Verteilung ist die Verwendung von Normalstatistik zulässig (Glaser, 1978).

Der Mittelwert liegt bei -0.4 ± 0.45° (Standardfehler des Mittelwerts; mit Wiederholungen -0.11 ± 0.39°). Der Mittelwert weicht nicht signifikant von 0° ab ($t(1029) = -0.89$, $p = 0.38$). Hier zeigen sich also keine systematischen Abweichungen.
Betrachtet man jedoch die Versuchspersonen einzeln, findet man bei einigen eine Vorzugsrichtung (Tab. 5). Bei 9 von 10 Versuchspersonen besteht jedoch im ersten Durchgang keine deutliche systematische Abweichung; Versuchsperson *chb* scheint einen gewissen Vorzug im

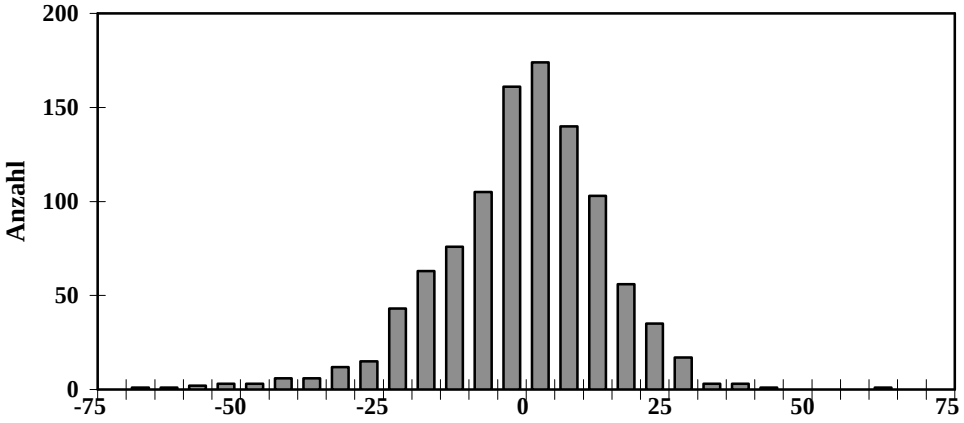

Abb. 5: Häufigkeit der Fehler in 5°-Schritten für alle Orte und Richtungen bei allen zehn Versuchspersonen in der realen Umgebung (N=1030; ohne Wiederholungen).

Vp	*MW*	*SE*	*SD*	*MWdFB*
abu	-1.4	1.7	17.2	12.3
abuz	-0.3	1.5	15.6	11.9
ado	-1.8	1.8	18.8	15.0
aja	1.6	1.5	15.6	12.4
and	-1.9	1.3	13.6	9.6
andz	-4.1	1.2	12.0	9.3
chb	-2.8	1.2	12.0	9.2
kas	1.1	1.3	13.1	9.9
kasz	4.7	1.1	11.1	9.8
mat	-0.6	1.3	13.6	10.0
ssh	-1.0	1.3	13.3	9.7
uls	1.3	1.4	14.2	11.0
ulsz	2.2	1.9	19.4	14.5
vlb	1.6	1.1	11.6	9.3
alle Vp	-0.11	0.39	14.7	10.9

Tab. 5: Mittlere Richtungsfehler in Grad (MW), dazugehörige Standardfehler (SE), Standardabweichung (SD) und Mittelwert der Fehlerbeträge (MWdFB) als Maß für die Größe des Fehlers bei den einzelnen Versuchspersonen (Vp) in der realen Umgebung. Einige Versuchspersonen wiederholten den Versuch; diese Wiederholungen sind bei den entsprechenden Versuchpersonen mit dem Buchstaben "z" am Ende des Versuchspersonenkürzels gekennzeichnet. In der letzten Reihe (alle Vp) sind die entsprechenden Werte für die Gesamtverteilung mit allen 14 Durchgänge angegeben.

Uhrzeigersinn zu haben. Versuchspersonen *and* und *kas* zeigen jedoch bei der Wiederholung des Versuches ebenfalls eine deutliche Abweichung.
Die Standardabweichungen der Richtungsfehler liegen für die einzelnen Versuchspersonen (Tab. 5) zwischen 11.1° und 19.4°. Die mittleren Fehlerbeträgen bewegen sich zwischen 9.2° und 15°.

Die Schätzungen sind insgesamt relativ genau. Dies läßt erstens erwarten, daß dieser Meßparameter sensitiv genug ist, um Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Umgebungen zu erfassen. Zweitens legen die relativ korrekten Richtungsschätzungen die Existenz einer metrischen mentalen Repräsentation der Umgebung nahe. Offen bleibt zunächst aber, ob der vorgefundene Fehler rein stochastisch bedingt ist oder auf systematische Verzerrungen in der Repräsentation der Versuchspersonen gegenüber der realen Karte zurückzuführen ist. Dieser Frage soll in den nächsten Abschnitten nachgegangen werden.

- Systematische Verzerrungen

In diesem Abschnitt sollen die Fehler genauer darauf untersucht werden, ob es bestimmte Orte oder Situationen gibt, in denen der Richtungsfehler systematisch von 0° abweicht. In Abbildung 6 sind die mittleren Richtungsfehler für die einzelnen Ortspaare an denen der Karte entsprechenden Positionen dargestellt (siehe auch Erläuterungen zu Abb. 6, in bezug auf die entsprechenden Daten der einzelnen Versuchspersonen siehe Anhang D.1).
In der Abbildung läßt sich sehen, daß der Fehler von A nach B nicht immer dem Fehler von B nach A entspricht. So ist der Fehler Markt → Johanneskirche nicht gleich dem Fehler Johanneskirche → Markt. Bei der weiteren quantitativen Auswertung wurde also zwischen "Von"-Fehlern und "Zu"-Fehlern unterschieden. Mit "Von"-Fehlern sind Fehler gemeint, die von einem bestimmten Ort in Richtung der übrigen Orte gemacht wurden. Mit "Zu"-Fehlern sind dagegen die Fehler gemeint, die in der Rückrichtung, d.h. von allen übrigen Orten zu diesem einen Ort, gemacht wurden (Abb. 7). Diese Art der Unterscheidung läßt Schlüsse auf die Art der vorliegenden Verzerrung zu, worauf weiter unten genauer eingegangen werden soll.

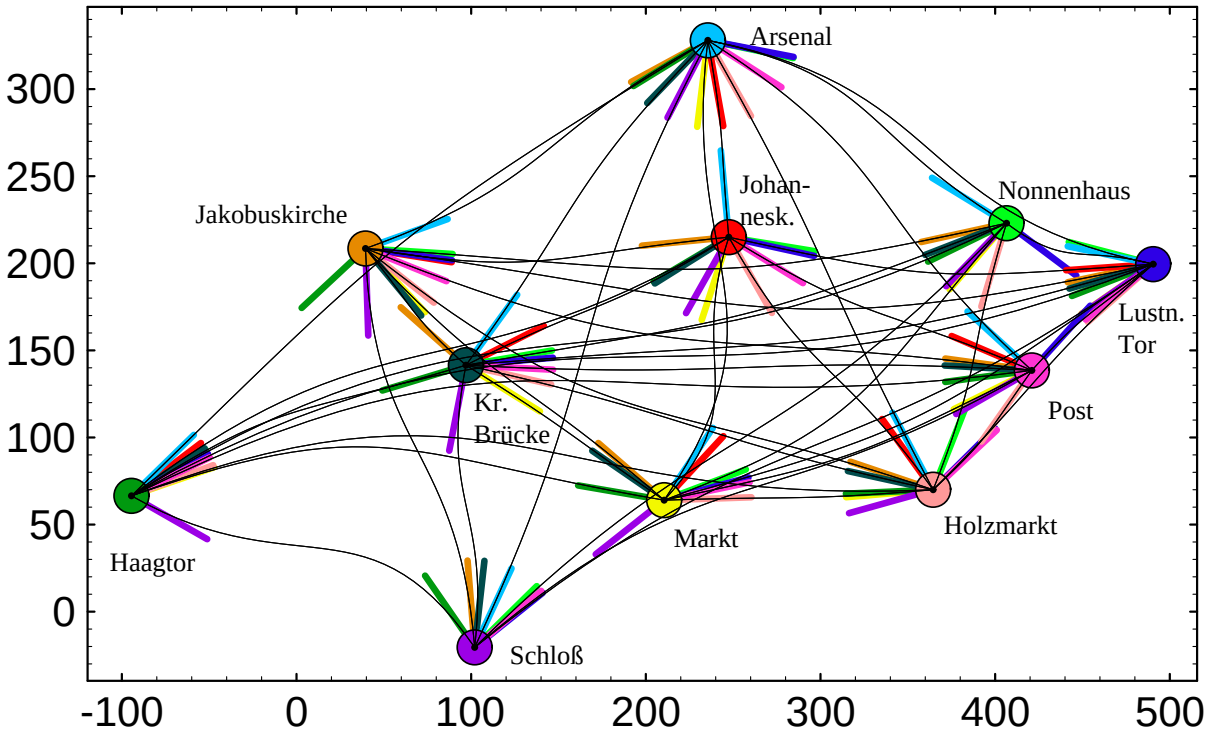

Abb. 6: Über alle Versuchspersonen (inklusive Wiederholungen) gemittelte Fehler für alle einzelnen Ortspaare. Die Abbildung soll eine grobe Übersicht über die gezeigten Richtungen vermitteln. Die verschiedenen Standorte sind dabei als farbkodierte Punkte gekennzeichnet und entsprechend ihrer Position auf der Karte angeordnet. Die von ihnen ausgehenden farbigen Linien geben die gezeigten, mittleren Richtungen zu den mit derselben Farbe gekennzeichneten Orten wieder. Die dünnen, schwarzen Linien sind Spline, die sich sowohl der von Ort A nach Ort B gezeigten Richtung als auch der von B nach A gezeigten Richtung anpassen. Die Zahlen an der x- und y-Achse sind als Koordinaten zu verstehen, die den Katasterplänen entnommen worden sind; die Einheiten entsprechen Metern. Bei einigen Ortspaare wurden Richtungsschätzungen nur von einem der beiden Orte aus vorgenommen, weil der Ort von der zweiten Lokation aus zu sehen war. In diesen Fällen fehlt von dem entsprechenden Ort aus die farbkodierte Linie und der die beiden Orte verbindende Spline. (Folgende Richtungen wurden nicht gezeigt: Schloß→Markt, Schloß→ Johanneskirche, Schloß→ Holzmarkt, Haagtor→ Jakobuskirche, Nonnenhaus→ Johanneskirche, Nonnenhaus→ Post, Post→ Nonnenhaus.)

Die Fehler an bzw. zu den verschiedenen Orten sind unterschiedlich groß: An bestimmten Orten findet sich ein besonders großer mittlerer Fehler, während er an anderen Orten eher klein ist. So ist der "Von"-Fehler am Markt, dem Haagtor und der Jakobuskirche besonders groß, während er an anderen Orten wie Holzmarkt oder der Krümmen Brücke nicht deutlich von 0° abweicht.
"Von"- und "Zu"-Fehler an einem bestimmten Ort können unterschiedlich groß sein oder unterschiedliches Vorzeichen haben. Außerdem ist zu beobachten, daß die "Von"-Fehler in der Regel größer als die "Zu"-Fehler sind.

Teilweise zeigen sich bei den einzelnen Versuchspersonen deutliche Unterschiede zu dem mittleren Richtungsfehler an den verschiedenen Orten (Anhang D.2 und Abb. 7). Bei den Plätzen mit großen mittleren "Von"-Fehler wie Markt, Haagtor und Jakobuskirche stimmt jedoch zumindest immer (bis auf eine Ausnahme, s. Anhang D.2) bei allen Versuchspersonen das Vorzeichen des Fehlers überein.
In einigen Fällen werden von oder zu bestimmten Orten auch große Fehler gemacht, die aber nicht in der Größe des mittleren Richtungsfehler sichtbar sind, aber durch den Betrag des Fehlers (bzw. der SD) von oder zu diesem Ort deutlich werden (Abb. 8). In diesem Fall treten

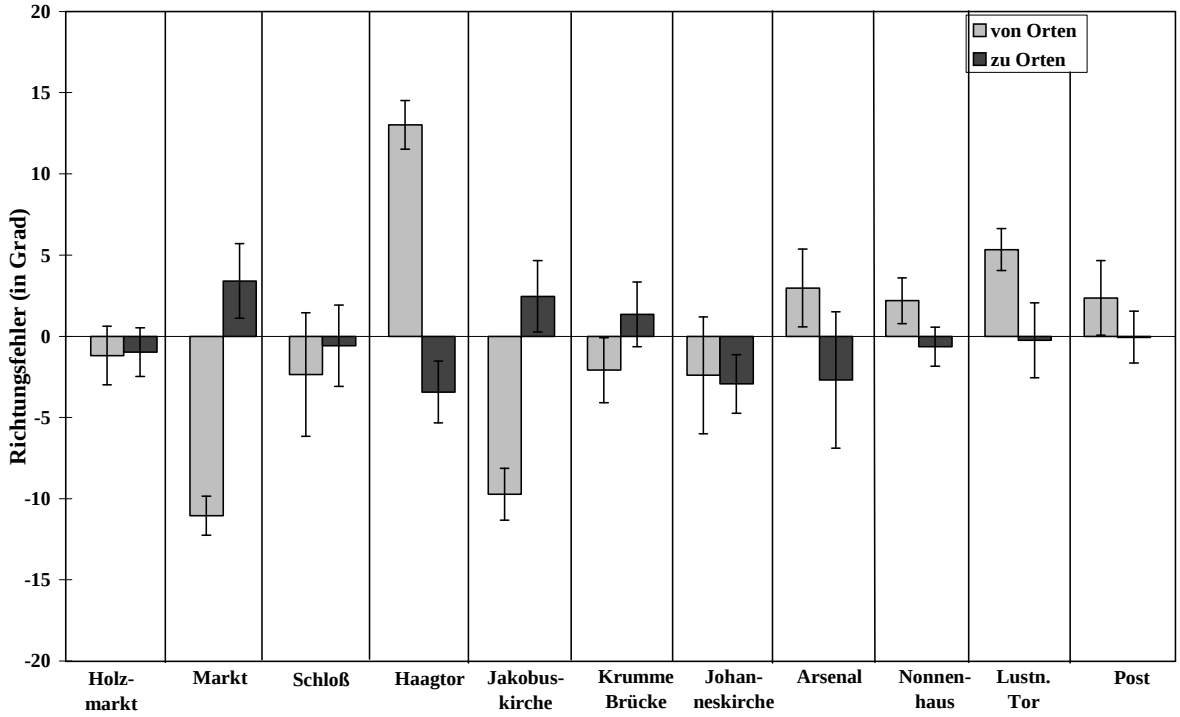

Abb.7: Mittlere Richtungsfehler von und zu Orten (über Mittelwerte der 10 Versuchspersonen an den jeweiligen Orten). Die Abbildung zeigt die mittleren Fehler, die entweder von einem Ort A in alle anderen Richtungen gemacht wurden (helle Balken) bzw. von diesen letzteren Orten zu dem einen Ort A gemacht wurden (dunkle Balken). Die Fehlerbalken geben den jeweiligen Standardfehler an.

bei jeder einzelnen Versuchspersonen sowohl größere positive als auch negative Fehler an diesem Ort auf oder verschiedene Versuchspersonen haben unterschiedliche Vorzugsrichtungen. Dies ist z.B. beim Schloß der Fall. Der mittlere Richtungsfehler über alle Versuchspersonen weicht hier nur geringfügig von 0° ab; es zeigt sich allerdings ein großer Standardfehler. Der mittlere Fehlerbetrag von diesem Ort ist sehr groß. Vergleicht man die Werte verschiedener Versuchspersonen stellt man fest, daß deren mittlerer Richtungsfehler sowohl in der Größe als auch im Vorzeichen variiert (Anhang D.2). Auch innerhalb einer Person kann der Fehler vom Schloß in die verschiedenen Richtungen stark schwanken; bei Mittelwerten über alle Versuchspersonen findet man je nach gezeigter Richtung Werte zwischen etwa -30° und 10°.
Insgesamt bewegen sich die mittleren Fehlerbeträge der "Von"-Fehler zwischen 6.3° (Holzmarkt) und 16° (Schloß). Bei den "Zu"-Fehlern finden sich Werte zwischen 8.9° (Holzmarkt) und 13° (Johanneskirche). Wie bei den mittleren Richtungsfehlern zeigt sich auch bei den mittleren Beträgen bei den "Von"-Fehlern ein größerer Schwankungsbereich als bei den "Zu"-Fehlern.

Wie läßt sich nun dieses Muster an Fehlern erklären? Die generell große Übereinstimmung mit den korrekten Werten legt nahe, daß die räumliche Repräsentation des Menschen metrische Informationen enthält, diese aber bestimmten systematischen Verzerrungen unterliegen. Die beobachteten Fehler sind teilweise spezifisch für die jeweilige Versuchsperson (siehe Anhang D), teilweise aber auch allen oder zumindest den meisten Versuchspersonen gemeinsam.
Es stellt sich die Frage, was für Arten von Verzerrungen theoretisch denkbar sind und inwieweit diese geeignet sind, die beobachteten Fehler zu erklären. In allen Fällen sollen die Fehler

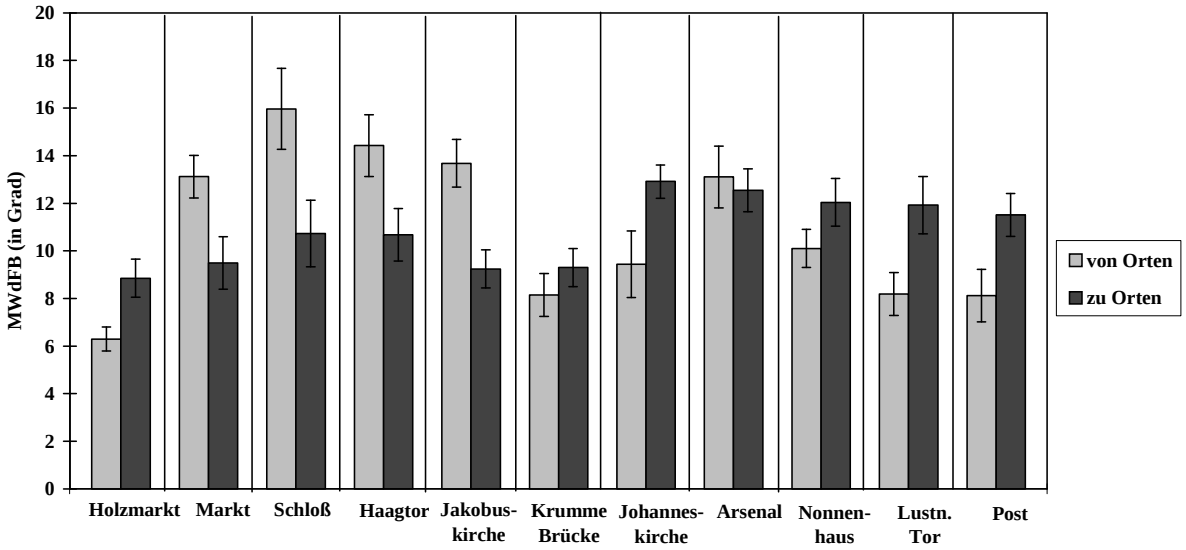

Abb. 8: Mittelwert der Fehlerbeträge (MWdFB) von und zu den verschiedenen Orten (über Mittelwerte der 10 Versuchspersonen) mit dazugehörigem Standardfehler.

hier im Sinne einer Verzerrung einer zweidimensionalen Karte interpretiert werden. Dabei kann man generell zwischen globalen und lokalen Verzerrungen unterscheiden, die sich in weitere Untergruppen unterteilen lassen.

Globale Verzerrungen

Globale Verzerrungen können als generelle Transformation der Karte beschrieben werden, d.h. die Karte wird als Ganzes gleichförmig verzerrt. So kann z.B. eine Versuchsperson statt von einem tatsächlich vorhandenen rechteckigen Grundplan von einem quadratischen oder auch trapezförmigen ausgehen. Die Lage der Orte und damit auch die gezeigten Richtungen ändern sich entsprechend der Verzerrung.
Bei diesen Verzerrungen unterscheidet sich der daraus folgende Richtungsfehler je nach Lage der Orte (Abb. 9). Dabei hat sowohl die Lage des Standorts, von dem aus die Schätzung vorgenommen wird, als auch der Lage des Ortes, in dessen Richtung gezeigt wird, Auswirkungen

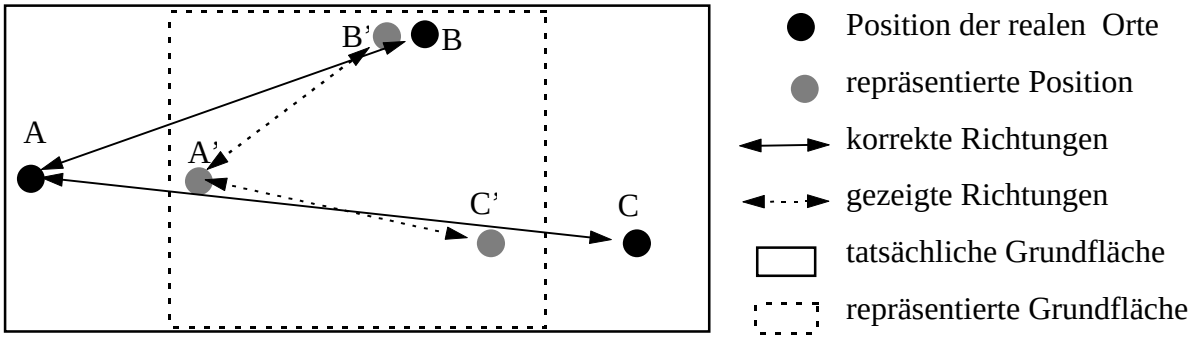

Abb. 9: Beispiel für eine globale Verzerrung. Durch die Verformung des Grundplans von einem ausgeprägt rechteckigem (schwarzer Kasten) zu einem fast quadratischen Grundplan (gestrichelter Kasten) verändert sich auch die Lage einzelner Orte entsprechend (schwarze und graue Kreisen). Richtungsschätzung A'→B' ist gegenüber der realen Situation A→B dabei entgegen dem Uhrzeigersinn versetzt, Richtungsschätzung A'→C' gegenüber der realen Situation dagegen im Uhrzeigersinn.

auf die Größe und das Vorzeichen des Fehlers. Bei einer Verzerrung von einem rechteckigem zu einem quadratischen Grundplan verändern sich Richtungen zwischen zwei Orten nicht, deren Verbindungslinie eine Parallele zur Umrißlinie der Karte bildet. Bei anderen relativen Lagen kann es von oder zu einem bestimmten Ort sowohl zu positiven als auch zu negativen Fehlern kommen. In den mittleren Fehlern von und zu Orten würde der resultierende Fehler also nicht erkennbar sein. Ob ein solcher Fehler vorliegt ist in gewissem Maße visuell abschätzbar an der Verteilung der Fehler wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. Dies scheint nicht der Fall zu sein.

Lokale Verzerrungen

Es sind verschiedene Arten von lokalen Verzerrungen denkbar. Im folgenden soll genauer auf zwei Verzerrungsformen, Dislokationen und Misorientierungen, eingegangen werden.

1. Dislokationen
Von einer lokalen Dislokation (Abb. 10) soll die Verschiebung eines einzelnen Ortes gegenüber seiner tatsächlichen Lage auf der Karte verstanden werden. Es können auch mehrere Orte verschoben sein; dabei ist die Größe und Richtung der Verschiebung aber ortsspezifisch. Bei einer Dislokation ist zu erwarten, daß die Fehler in Hin- und Rückrichtung zwischen einem Ortspaar in beiden Richtungen gleich groß sind und dasselbe Vorzeichen haben. Dies gilt jeweils für ein bestimmtes Ortspaar - bei verschiedenen Paaren von einem Ort aus kann aber je nach Lage des Partnerortes das Vorzeichen und auch die Größe des Fehlers variieren. Dieser Effekt ist quantitativ allerdings schwierig zu erfassen. Einen gewissen Hinweis können die Differenzen zwischen den Richtungsfehlern in Hin- und Rückrichtung der Ortspaare liefern. Die Beträge dieser Differenzen können pro Platz gemittelt werden. Je kleiner dieser Wert ist, desto wahrscheinlicher wird der beobachtete Richtungsfehler durch eine Dislokation verursacht. Das Problem bei diesem Differenzwert ist, daß die Bewertung seiner Skalierung nicht klar ist. Außerdem kann ein kleiner Differenzwert auch durch einen von vornherein kleinen Fehler zustande kommen. In andere Maße wie Korrelationen zwischen den Werten in den Hin- und jeweiligen Rückrichtungen oder Regressionen zwischen diesen beiden Werten - hier wäre eine Steigung von 1 zu erwarten - fließt außerdem eine mögliche Misorientierung ein.

Für ein Vorkommen von Dislokationen gibt es Hinweise für das Schloß (Tab. 6). Hier ist der Differenzmittelwert relativ klein, und es zeigt sich eine positive Steigung in der Regression.

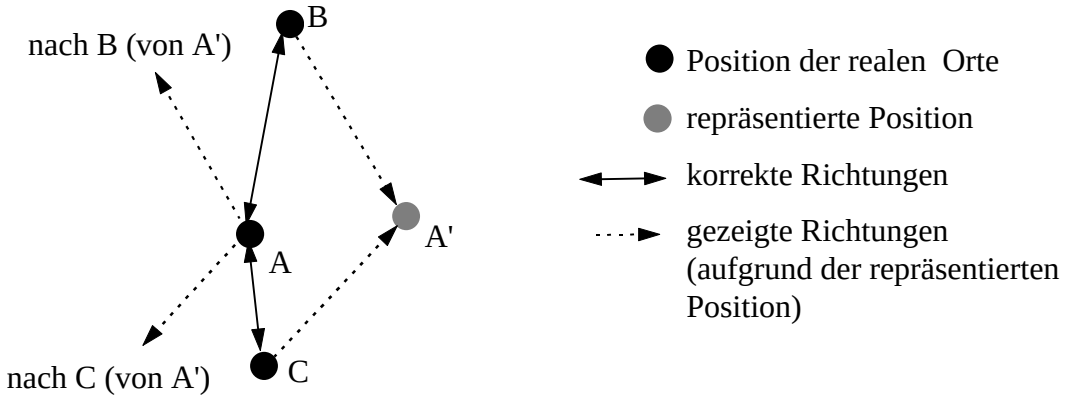

Abb. 10: Beispiel für Richtungsfehler, die bei einer Dislokation entstehen.

Orte	*Differenzmittelwerte*	*Steigung der Regressionsgeraden*	*Signifikanz der Regression*
Holzmarkt	7.6	-0.02	0.98
Markt	17.2	0.09	0.74
Schloß	7.3	0.37	0.11
Haagtor	15.5	1.18	0.016*
Jakobuskirche	12.3	0.88	0.12
Krumme Brücke	6.9	0.07	0.88
Johanneskirche	10.9	0.35	0.66
Arsenal	9.6	0.44	0.28
Nonnenhaus	13.8	-0.17	0.73
Lustn. Tor	11.3	0.42	0.56
Post	10.7	-0.73	0.59

Tab. 6: Differenzmittelwerte und Steigungen der Regressionsgeraden (letztere mit jeweiligem Signifikanzwert) für die elf verschiedenen Standorte.

Für das Arsenal und die Krumme Brücke sind die Differenzmittelwerte im Vergleich zum Mittelwert der Fehlerbeträge an diesen Orten relativ klein. Für Haagtor und Jakobuskirche deutet die durch eine Regression ermittelte Steigung ebenfalls auf eine mögliche Dislokation hin. Die erwähnten Regressionen sind allerdings nur für das Haagtor signifikant.

2. Misorientierungen

Bei einer Misorientierung (Abb. 11) geht die Versuchsperson von einer falschen Orientierung des jeweiligen Ortes gegenüber der restlichen Welt aus, d.h. der Ort ist gegenüber der Umwelt gedreht. Dadurch haben alle Fehler von diesem Ort dieselbe Größe und dasselbe Vorzeichen. Daher sollte bei dem mittlerem Richtungsfehler ein deutlicher "Von"-Fehler zu beobachten sein. Diese falsche Orientierung könnte dann graduell oder auch relativ abrupt nachlassen. In der Rückrichtung muß bei dieser Verzerrungsform nicht unbedingt ein Fehler auftreten. Der mittlere "Zu"-Fehler könnte aus zufälligen Fehlern oder einer Überlagerung verschiedener systematischer Fehler an den anderen Orten resultieren.

Ein deutlicher "Von"-Fehler läßt sich am Markt, an der Jakobuskirche und am Haagtor finden (Abb. 7). Der "Zu"-Fehler an diesen Orten ist eher unauffällig, was ebenfalls in Einklang mit den gemachten Annahmen steht.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Verteilung der Fehler keine Hinweise auf globale Verzerrungen gibt. Die Fehler deuten vielmehr auf lokale Dislokationen und Misorientierun-

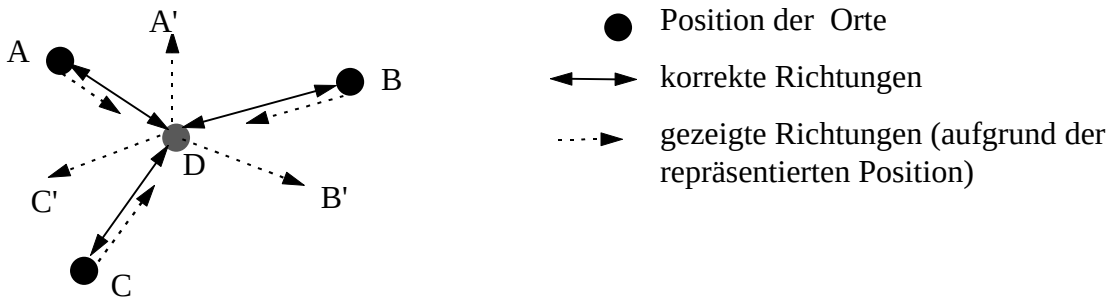

Abb. 11: Beispiel für Richtungsfehler, die bei einer Misorientierung entstehen. Hier ist es Ort D, der misorientiert ist.

gen hin. Die beobachteten Richtungsfehler vom Markt, der Jakobuskirche und dem Haagtor zeigen die Merkmale, die für eine Misorientierung gefordert wurden. Eine Dislokation könnte für das Schloß, das Arsenal, Jakobuskirche und Haagtor eine Rolle spielen. Natürlich können sich auch verschiedene Effekte überlagern. So gibt es z.B. für das Haagtor Hinweise sowohl auf eine Misorientierung als auch auf eine Dislokation. Insgesamt macht dies es natürlich schwer, eine definitive Aussage über die Effekte im einzelnen zu treffen. Aussagekräftige Aussagen könnten nur durch eine starke Erhöhung der Anzahl der Richtungsschätzungen pro Versuchsperson, der Anzahl der Plätze und/oder der Anzahl der Versuchspersonen erwartet werden.

- Konstanz über die Zeit

Ferner stellt sich die Frage, ob die beobachteten Verzerrungen einen stabilen, andauernden oder nur einen momentanen Zustand der kognitiven Karte widerspiegeln. Um diese Frage zu beantworten, wiederholten vier Versuchspersonen das Experiment in der realen Umgebung. Um die Übereinstimmung der Schätzungen im ersten und zweiten Durchgang zu quantifizieren, wurden die Differenzen zwischen den korrespondieren Werten der jeweiligen Versuchsperson in den beiden Versuchsdurchgängen gebildet:

Differenzfehler = Richtungsfehler im ersten Durchgang - korrespondierender Fehler im zweiten Durchgang.

Mit korrespondierendem Fehler ist dabei der Fehler am jeweils gleichen Ort und in die gleiche Richtung gemeint. Teilweise wurde auch der Betrag dieser Differenzfehler weiter ausgewertet (MWdFB der Differenzen). Man kann die Hypothese aufstellen, daß die Fehler entweder sämtlich systematisch sind oder alternativ sämtlich auf der zufälligen Streuung der Werte beruhen. Je nach Hypothese über die Ursache des Fehlers lassen sich unterschiedliche Standardabweichungen der Differenzfehlerverteilung erwarten. Natürlich ist auch eine Mischform zwischen den Hypothesen möglich. Die Standardabweichung sollte dann ebenfalls in entsprechender Weise zwischen den vorhergesagten Extremwerten liegen.

Dabei wird für die beiden Hypothesen Folgendes erwartet:

Hypothese 1: Alle Fehler sind systematisch

> Dies bedeutet, daß die Fehler im ersten und zweiten Durchgang identisch sind. Beim Bilden der Differenz sind also alle Werte gleich null. Dementsprechend ist auch die Standardabweichung der Differenzwerte (bzw. der MWdFB der Differenzen) gleich null.

Hypothese 2: Alle Fehler sind bedingt durch die zufällige Streuung der Werte

> In diesem Fall beeinflußt sowohl die Streuung der Werte beim ersten Durchgang (bzw. die Standardabweichung als Maß dafür) als auch die im zweiten Durchgang die Verteilung der Differenzwerte. Durch die Überlagerung der Streuungen der beiden Verteilungen ist die resultierende Standardabweichung der Differenzwerte theoretisch $\sqrt{2}$mal größer als das Mittel der beiden ursprünglichen Standardabweichungen; bei den gegebenen Werten wären dies 20.5° (=14.5*$\sqrt{2}$) (Tab. 7).

Die Standardabweichung der Differenzwerte ist nicht gleich null, aber auch deutlich geringer als nach Hypothese 2 (siehe Tab. 7) erwartet. Keine der beiden Hypothesen kann also für sich die Werte erklären. Die Daten weisen vielmehr darauf hin, daß sich die Fehler sowohl aus einem systematischen als auch einem zufälligen Anteil zusammensetzen. Bei der gefundenen Standardabweichung der Differenzfehler von 11.4° ist der Anteil von stochastischen und systematischen Fehlern am Gesamtfehler in etwa gleich groß. Letztendlich wird dadurch aber das im vorigen Abschnitt vermutete Vorkommen von systematischen Verzerrungen bestätigt (es war nicht zu erwarten, daß es überhaupt keinen zufälligen Fehler gibt).
Zugleich weist dies auch darauf hin, daß die Schätzungen über die Zeit relativ stabil sind. In Hinblick auf die Versuche in der virtuellen Umgebung bedeutet dies, daß Unterschiede zwischen den beiden Umgebungen in großem Maße auf Effekte der Umgebung zurückzuführen sein werden, nicht auf zufällige Fluktuationen in den Schätzungen. Außerdem beträgt der MWdFB der Differenzen (Tab. 7), der nur die stochastischen Fehler beinhaltet, nur 8°. Dies zeigt die hohe Qualität der metrischen Information in der räumlichen Repräsentation der Versuchspersonen.

Vp	*abu*	*and*	*kas*	*uls*	*MW*
MWdFB					
Real1	12.3	9.6	9.9	11.0	10.7
Real2	11.9	9.3	9.8	14.5	11.4
Real1-Real2	7.8	6.8	9.3	7.8	8.0
SD					
Real1	17.2	13.6	13.1	14.2	14.5
Real2	15.6	12.0	11.1	19.4	14.5
Real1-Real2	11.4	9.9	12.1	12.2	11.4

Tab. 7: MWdFB und SD der Richtungsfehler im ersten und zweiten Durchgang und mittlere Differenzwerte der vier Versuchspersonen, die den Versuch in der realen Welt zweimal durchführten. In der letzten Spalte sind die jeweiligen Mittelwerte angegeben.

- Eingesetzte Strategie

Auch die subjektive Bewertung der verschiedenen Versuchspersonen, nach welcher Strategie sie ihre Richtungsentscheidungen getroffen haben, kann unter Umständen Einsichten über die zugrunde liegende Repräsentation vermitteln. Deshalb wurden die Versuchspersonen im Rahmen eines Fragebogens (siehe Anhang C) nach Beendigung des Versuches auch nach der Strategie befragt, die sie ihrer Meinung nach zum Lösen der Aufgabe angewandt hatten. Die Versuchspersonen gaben häufig mehrere Strategien an, die sie wechselweise oder gleichzeitig verwendeten.

Die Versuchspersonen konnten ihre Strategien frei formulieren. Die Aussagen lassen sich jedoch in die folgenden Gruppen einordnen:
- mentales Nachvollziehen der Straßenverläufe vom eigenen Standort, d.h. der Weg wurde in Gedanken nachgegangen (von allen Versuchspersonen angegeben)
- Orientierung an gerade sichtbaren Landmarken (vlb, ssh, mat, aja, ado)
- spontane Schätzung (vlb, uls, ado)
- Vorstellen einer globalen Karte (kas).

Alle Versuchspersonen gaben an, in Gedanken den Weg zu dem gefragten Ort abgegangen zu sein. Im Rahmen dieser Strategie wurden teilweise ergänzende Strategien verwendet. Eine Versuchsperson (ssh) gab an, teilweise auch andere, markante Plätze als Ankerpunkte für sol-

che Schätzungen zu benutzen. In einem anderen Fall (chb) ging die Versuchsperson gegebenenfalls in Gedanken eine Alternativroute ab, um die geschätzte Richtung zu verifizieren.

- Übrige Analysen

a) Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Versuchspersonen

Der Mittelwert über die Standardabweichungen der einzelnen Versuchspersonen ist bei Frauen und Männern signifikant unterschiedlich ($t(8) = 2.8$, $p < 0.05$). Der Fehler ist dabei bei den Frauen (15.8 ± 1.0°) höher als bei den Männern (12.8 ± 0.4°; Abb. 12). Aufgrund der geringen Versuchspersonenanzahl sollten aus dem gefundenen Effekt aber keine weitreichenden Rückschlüsse auf geschlechtsspezifische Unterschiede gezogen werden. In anderen Experimenten mit ähnlichen Methoden wurden teilweise signifikante Unterschiede gefunden (Anooshian und Young, 1981), in vielen anderen Fällen aber auch nicht (Kozlowski und Bryant, 1977; Cousins et al., 1983, Okabe et al., 1986).

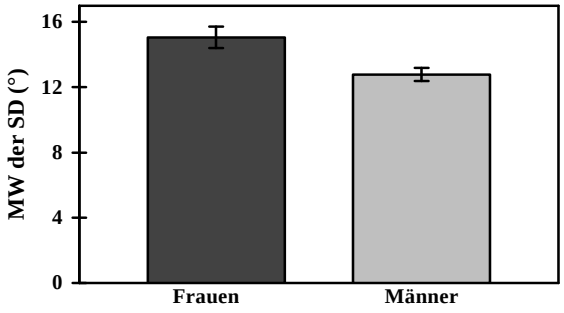

Abb. 12:
Die Abbildung zeigt die Mittelwerte und Standardfehler über die Standardabweichungen der Frauen (dunkler Balken, n=5) und die der Männer (heller Balken, n=5).

b) Lerneffekte

Es sollte kontrolliert werden, ob Lerneffekte die Ergebnisse beeinflußt haben. So wäre es z.B. denkbar, daß die Versuchspersonen die Versuchsumgebung zwar sehr gut kennen, aber vielleicht nie die Art von Information aufgenommen haben, die sie zur Lösung der gestellten Aufgabe benötigen, sondern dies erst im Laufe des Versuches tun. Eine andere Erklärung für einen möglicherweise auftretenden Lerneffekt könnte ein besseres Zurechtkommen mit dem Versuchsparadigma gegen Ende des Versuches sein. Um diese Frage zu beantworten, wurden die MWdFB an den verschiedenen Orten nach der Reihenfolge, in der die Plätze aufgesucht wurden, ausgewertet (Abb. 13). Es zeigte sich aber keine konstante Verringerung der Fehler im Laufe des Versuches; der MWdFB über alle 10 Versuchspersonen am beträgt am zuerst aufgesuchten Ort 13.3 ± 1.8°, am zuletzt aufgesuchten Ort 12.1 ± 1.6°.

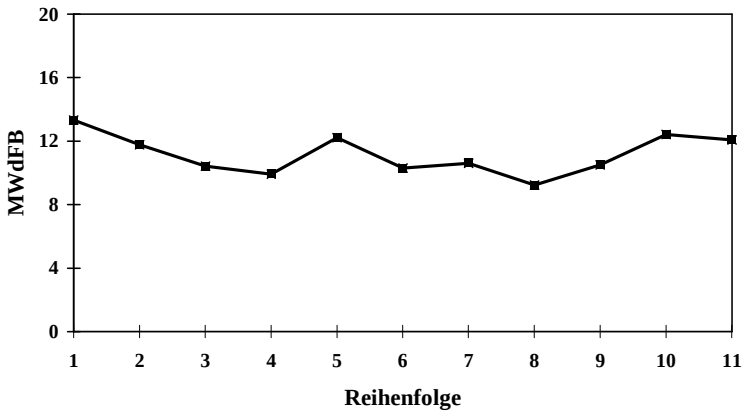

Abb. 13: Mittelwerte der Fehlerbeträge (MWdFB) aller Versuchsperson (n=10) der jeweils an erster bis elfter Stelle aufgesuchten Orte. Die Werte zeigen leichte Schwankungen, aber keine eindeutige, abnehmende Tendenz.

Auch bei den vier Versuchspersonen, die den Versuch in der realen Umgebung zweimal durchführten, zeigten sich im Durchschnitt bei Wiederholung des Versuches keine Verbesserung der mittleren Fehlerbeträge (Tab. 7). Die Versuchspersonen hatten also die zur Erfüllung der Aufgabe notwendige Information bereits im täglichen Umgang mit der Umgebung erworben. Auch das Versuchsparadigma scheint einfach genug zu sein, so daß sich hier kein Lerneffekt ergibt.

c) Andere Faktoren

Es wurde untersucht, ob die Vertrautheit der einzelnen Orte eine Auswirkung auf den Schätzfehler hat. Die Versuchspersonen sollten auf dem Fragebogen (Anhang C) außerdem auf einer Skala von 1 bis 5 (= sehr gut bis sehr schlecht) angeben, wie gut sie die einzelnen Orte kennen (Abb. 14). Der MWdFB der Orte mit der Einstufung "1" beträgt 9.4 ± 0.5° (n=55), der

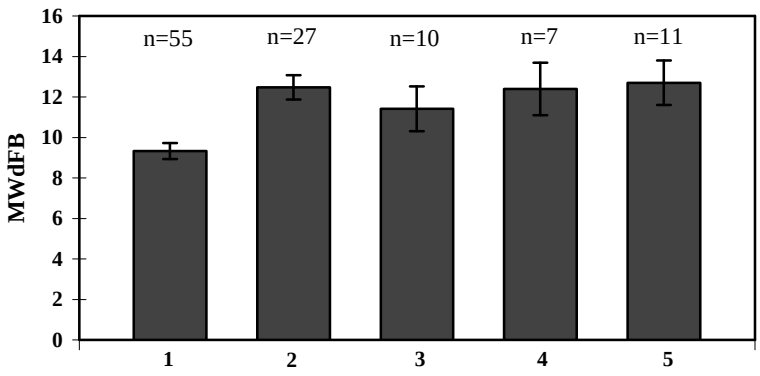

Abb. 14: Effekt der Vertrautheit auf die mittleren Fehlerbeträge der Schätzungen. Auf der x-Achse ist die Einstufungsskala aufgetragen. Über den Balken ist die Anzahl der Orte angegeben, die von den Versuchspersonen insgesamt dieser Kategorie zugeordnet wurden. Die Standardabweichungen beruhen aber auf allen Einzelbeträgen der Richtungsfehler, die von den jeweiligen Orten gemacht wurden (also etwa der zehnfachen Anzahl von Werten).

MWdFB der Orte mit der Einstufung "5" 13.1 ± 2° (n=11). Der Versuchsaufbau setzte dabei aber eine Kenntnis aller Plätze voraus, so daß die verschiedenen Orte insgesamt sehr gut bekannt waren, was die statistische Auswertung schwierig macht. Der Fehler an den am besten bekannten Orten scheint etwas geringer zu sein; zwischen den anderen Einstufungen wird jedoch kein Unterschied deutlich. Cousins et al. (1983) fanden in ihren Versuchen mit Kindern auch einen Effekt der Vertrautheit auf den Fehler von Richtungsschätzungen

Im Fragebogen wurden noch nach einigen anderen Sachverhalten gefragt, die möglicherweise in Beziehung mit der Genauigkeit der Richtungsschätzungen bzw. der Vorgehensweise der Versuchspersonen stehen. Dazu gehören die Wohndauer in Tübingen, die eigene Einschätzung des Orientierungssinns und das Benutzen von Karten der Innenstadt bzw. die Kenntnis des Luftbildes der Innenstadt. Wegen der geringen Versuchspersonenzahl sollten jedoch mögliche Schlußfolgerungen mit Vorsicht betrachtet werden. In bezug auf Kartennutzung ist zu sagen, daß zwar alle Versuchspersonen eine Karte der Tübinger Innenstadt gesehen hatten, diese aber selten benutzten. Zusammen mit den Aussagen der Versuchspersonen über die verwendete Strategie erscheint es daher unwahrscheinlich, daß sie die Richtungsschätzungen anhand dieser Karte vorgenommen haben. Allerdings läßt es sich nicht ausschließen, daß durch das Betrachten der Karte ein genereller, strukturierender Effekt auf das Wissen von der Umgebung ausgeübt wurde.

5.2.3 Diskussion

In den Experimenten zeigt sich deutlich, daß die räumliche Repräsentation des Menschen metrische Information enthält. Die Genauigkeit der Schätzungen der Versuchspersonen kann

nur durch Vorhandensein solcher Information erklärt werden. Auch in der Literatur (z.B. Hardwick et al, 1976; Thorndyke und Hayes-Roth, 1982; Kozlowski und Bryant, 1977) ist in Versuchen mit Richtungs- oder Distanzschätzungen solches Wissen nachgewiesen worden (s. auch Abschnitt 2.6.2).

Genauigkeit von Richtungsschätzungen

Die Genauigkeit der Schätzungen, wie sie in der Literatur angegeben wird, variiert teilweise erheblich. Im Vergleich zu anderen Versuchen sind die hier gefundenen Fehlerwerte relativ gering. Dies ist eine gute Voraussetzung für Vergleiche zwischen zwei Umgebungen. Die meisten anderen Studien zeigen allerdings mittlere Fehlerbeträge der Schätzfehler zwischen 20° und 30° (hier: 10.9°). Aus der Literatur kristallisieren sich mehrere Faktoren heraus, die einen Einfluß auf die Richtungsschätzungen haben könnten. Größe, Vertrautheit mit der Umgebung und Komplexität derselben können einen Einfluß auf die Genauigkeit von Richtungsschätzungen haben. Andere beeinflussende Faktoren sind das Alter der Versuchspersonen und deren individuelle Fähigkeiten. Es gibt Hinweise darauf, daß Richtungsschätzungen in Großfeldumgebungen (d.h. Umgebungen, die visuell nicht von einem Standpunkt aus wahrnehmbar sind) ungenauer sind als in Kleinfeldumgebungen (Colle und Reid, 1998). In einem Fall, einem Krankenhaus mit einem sehr komplexen Grundriß, kommen die Experimentatoren sogar zu dem Schluß, daß die Versuchspersonen kein Überblickswissen von dem Gebäude besitzen (Moeser, 1986). Hier diente ebenfalls eine Großfeldumgebung, die Tübinger Innenstadt, als Versuchsumgebung. Die Schätzungen unserer Versuchspersonen sind dennoch korrekter als in vielen anderen in Großfeldumgebungen durchgeführten Versuchen (z.B. in Gebäuden, Campus- oder Schulgeländen, Wohnvierteln oder Innenstädten); in Übereinstimmung mit den Erwartungen waren die Schätzungen in der Tübinger Innenstadt allerdings schlechter als Schätzungen innerhalb eines Raumes (Hardwick et al., 1976). Es gibt jedoch andere Faktoren, die ein relativ gutes Abschneiden unserer Versuchspersonen erwarten lassen. So handelt es sich bei unseren Versuchspersonen um Erwachsene, nicht um Kinder. In Versuchen mit Kindern verschiedener Altersgruppen zwischen sechs und vierzehn Jahren zeigt sich eine signifikante Verbesserung der Leistungen (Anooshian und Young, 1981; Herman et al., 1987), während danach im Vergleich zu Erwachsenen keine weitere Verbesserung mehr erfolgt (Hardwick et al., 1976). Auch die gute Kenntnis der Umgebung läßt eine hohe Genauigkeit unserer Versuchspersonen erwarten. In Experimenten von Thorndyke und Hayes-Roth (1982) verbesserten sich die mittleren Fehler in einer realen Umgebung (Bürogebäude) von 24° auf 19°, wenn die Versuchspersonen die Umgebung statt 1-2 Monate schon 12-24 Monate kannten. Angesichts der langen Wohndauer in Tübingen (durchschnittlich 6 Jahre) haben die Fehler der Versuchspersonen bei Richtungsschätzungen vermutlich ein stabiles, niedriges Niveau erreicht. Dabei zeigte sich ein - allerdings kleiner - Unterschied zwischen gut und schlecht bekannten Orten (Abb. 14). Ähnliches zeigte auch ein Versuch von Kozlowski und Bryant (1977): In einem Tunnelsystem mit mehreren Biegungen sollte vom Ausgangspunkt die Richtung des Endpunktes gezeigt werden. Die Autoren unterteilten dabei die Versuchspersonen in zwei Gruppen; Versuchspersonen der ersten Gruppe besaßen nach eigenen Angaben einen guten Orientierungssinn, die der zweiten einen schlechten. Die Versuchspersonen mit guten Orientierungssinn verbesserten sich von einem mittleren Fehler von etwa 55° nach einmaligem Begehen eines gewundenen Tunnels auf 25° nach 5 Durchläufen. Die Versuchspersonen mit schlechtem Orientierungssinn verbesserten sich dagegen nicht. Auch bei Schätzungen von Richtungen von Gebäuden auf einem Campusgelände waren Versuchspersonen mit gutem Orientierungssinn deutlich besser als solche mit schlechtem Orientierungssinn (19.3° gegenüber 33.2°). Ein solcher Unterschied zwischen Versuchspersonen mit nach eigener Einschätzung gutem bzw. schlechtem Orientierungssinn fand sich bei uns nicht. Al-

lerdings sind die Versuchspersonenzahlen auch zu gering, um eine signifikante Aussage zu erwarten.

Systematische Fehler

Die Richtungsschätzungen zeigen systematische Fehler. Diese Fehler lassen sich als Dislokationen und Misorientierungen einzelner Orte auf einer Karte interpretieren. Warum aber bestimmte Orte in der gerade vorgefundenen Weise und dem Ausmaß verzerrt sind oder ob es andere Ursachen für diese systematischen Fehler gibt, darüber kann hier aber nur spekuliert werden; der Versuchsaufbau war nicht auf diese Fragestellung ausgerichtet und somit nicht geeignet, mögliche Ursachen kontrolliert zu untersuchen. Theoretisch als Ursachen denkbar wäre z.B. die Nähe von großen Gebäuden u.ä., die die Sicht versperren. Versuchspersonen könnten ungern auf eine solche "Wand" zeigen. Eine andere Erklärung betrifft die Entfernung zwischen den Orten; es wäre vorstellbar, daß der Fehler um so größer wird, je weiter die Orte voneinander entfernt sind. Dabei wird aber keine Voraussage über die Richtung des Fehlers, sondern nur über dessen Betrag gemacht. Ein solche Beziehung scheint in unseren Ergebnissen jedoch nicht zu bestehen. Andererseits könnte auch die Anzahl der Richtungsänderungen zwischen Ausgangs- und Zielort entscheidend sein; bei dieser Hypothese besteht ebenfalls nur eine Erwartung über den Betrag des Fehlers. Hier könnte bei unseren Daten eventuell eine Beziehung bestehen. Die Frage ist aber nicht kontrolliert untersuchbar - so ist unklar, ab welcher Größe des Winkel eine Straßenbiegung als Richtungsänderung angesehen wird oder welche von mehreren möglichen Routen als Referenz genommen wird. In einer künstlichen, speziell für diese Fragestellung konstruierten Umgebung könnte dieser Frage nachgegangen werden. Ein Effekt der Anzahl der Richtungsänderungen auf die Größe des Richtungsfehlers konnte in anderen Versuchen teilweise gefunden, aber nicht immer repliziert werden (Herman et al., 1986). Eine weitere Erklärungsmöglichkeit ist ein Einfluß der Richtung, an dem der Weg zu dem gefragten Ort außer Sicht gerät. Okabe et al. (1986) fanden einen solchen Zusammenhang in den Richtungsfehlern. Bei der Tübinger Innenstadt als Versuchsumgebung tritt jedoch wieder dasselbe Problem wie bei der vorigen Hypothese auf - es ist nicht unmittelbar offensichtlich, welche von mehreren möglichen Routen von der Versuchsperson zur Schätzung der Richtung herangezogen wurde. Ein solcher Fehler wäre in Übereinstimmung mit der Angabe der Versuchspersonen, zur Erfüllung der Aufgabe in Gedanken den Weg verfolgt zu haben. Dies entspricht mentalen Visualisierungsprozessen (mental imagery), wie sie von Kosslyn (1988) beschrieben werden. Bei Fragestellungen wurden in bezug auf räumliche Beziehungen können je Art der Fragestellung Aktivitäten in verschiedenen Gehirnarealen gefunden, in denen räumliche Beziehungen in unterschiedlicher Form repräsentieren. In der hier gestellten Aufgabe könnten beide angesprochenen Formen von Gedächtnis bei der Beantwortung der Aufgabe mitwirken. Interessant in diesem Zusammenhang ist auch, daß eine der Versuchspersonen (abu) den Zeiger zunächst in die Richtung drehte, an dem der Weg zum Ziel das Gesichtsfeld verließ und bei dem mentalen Ablaufen der Route den Zeiger kontinuierlich nachführte. In einem Fall machte sie eine aufschlußreiche Bemerkung: Zunächst verfolgte sie einen Weg, der rechts von der Richtung des Zielortes aus dem Blickfeld verschwand. In dem Fall machte die Versuchsperson ebenfalls einen Schätzfehler nach rechts. Nach kurzem Überlegen wandte sie den Blick zu einer Alternativroute, die im linken Teil des Blickfeldes verschwand, und kommentierte, daß sie beim Verfolgen dieser Route den geschätzten Ort weiter links vermutete. Schließlich wählte die Versuchsperson eine Richtung, die zwischen diesen beiden Bereichen lag. Dieses Beispiel spricht außerdem eher für die Vorstellung, daß metrisches Wissen direkt vom ersten Kontakt mit der Umwelt besteht, aber der Fehler in der intern repräsentierten Metrik im Laufe der Zeit durch Abgleich mit neu kennengelernten Routen eingeschränkt wird (Aginsky, 1996) als für das Modell von Siegel und

White (1975), nach dem zunächst nur Routenwissen und erst später (metrisches) Übersichtswissen von der Umwelt gebildet wird. Als Dislokationen interpretierbare Fehler fanden sich aber auch in Paper-und-Pencil-Aufgaben oder Modellrekonstruktionsaufgaben (May, 1992; Giraudo und Pailhous, 1994), d.h. Versuchen ohne unmittelbaren Sinneseindruck. Entweder hat die Richtung, in der der Weg verschwindet, auch ohne direkten Sinneseindruck eine Wirkung oder es liegt bei dieser Art von Versuchen eine andere Ursache für die Verzerrungen vor. Auch in Wegintegrationsaufgaben mit verbundenen Augen finden sich systematische Fehler (Fujita et al., 1993). So könnte also auch die Verarbeitung von kinästhetischer Information zu einem Fehler in den Richtungsschätzungen beitragen.

Metrische Information in der räumlichen Repräsentation des Menschen

In der Regel wird das Vorhandensein von korrekten Richtungsschätzungen (bzw. solchen, die sich deutlich von einem durch Zufall erzielten Ergebnis unterscheiden) als Beweis einer metrischen räumlichen Repräsentation angesehen. Die hier beobachteten Richtungsschätzungen können tatsächlich im Sinne von Kartenwissen mit systematischen Verzerrungen und einem stochastischen Fehleranteil erklärt werden. Die Wiederholung des Versuches durch vier Versuchspersonen deutet darauf hin, daß die gefundenen Verzerrungen über die Zeit ähnlich bleiben. Auch in anderen Untersuchungen wurden ebenfalls systematische Fehler gefunden (May, 1992; Giraudo und Pailhous, 1994). Teilweise wurden Fehler durch Eingliederung des Wissens in bestimmte hierarchische Strukturen oder durch vereinfachende Annahmen der Versuchspersonen erklärt, z.B. daß die Winkel an Kreuzungen 90° betragen (Stevens und Coupe, 1978; Byrne, 1979); es ist aber unklar, was in unserem Experiment solche Strukturen sein könnten bzw. wie sie sich solche Annahmen in der komplex aufgebauten Tübinger Innenstadt auf die Richtungsschätzungen auswirken.

Entgegen der allgemeinen Annahme, daß relativ genaue Richtungsschätzungen ein Beweis für eine metrische Repräsentation der Umwelt sind, lassen sich auch schon allein mit einer topologischen Karte mögliche Richtungen einschränken. Außerdem machten Versuchspersonen in einem Versuch von Wilson et al. (1997) auch zu Objekten innerhalb eines Gebäudes (wie Hinterausgang oder einem Fenster) Richtungsfehler unterhalb des Rateniveaus, obwohl sie das Gebäude niemals von innen, sondern nur von außen gesehen hatten. Bei der Komplexität und Irregularität der Straßenverläufe in der Tübinger Innenstadt und der hohen Genauigkeit der Schätzungen scheidet ein generalisiertes Wissen darüber, wo sich in einer Umgebung in der Regel bestimmte Objekte befinden, als (alleinige) Erklärungsmöglichkeit für die erzielten Ergebnisse aus. Dennoch sind auch andere Erklärungsmöglichkeiten als eine metrische Karte für die gezeigten Leistungen nicht ausgeschlossen. Dabei soll nicht das Vorhandensein von metrischem Wissen selbst in Frage gestellt werden, sondern nur wie dieses in die Repräsentation von der Umwelt eingebunden ist. Für eine andere Form der Repräsentation sprechen z.B. Versuche von Herrmann und Schweizer (1998): Sie finden einen Einfluß der zuerst gelernten Routenrichtung. Soll von einem Objekt entschieden werden, ob es in einem Film einer Durchfahrt durch eine Modellumgebung gesehen wurde, findet sich in den Reaktionszeiten ein Richtungseffekt. Die Reaktionszeiten verkürzen sich, wenn kurz vorher (Priming-Paradigma) ein Objekt gezeigt wurde, das auf der gezeigten Route vor dem Testobjekt lag, aber nicht, wenn dieses auf der Route hinter dem Testobjekt lag. Außerdem beeinflußt die zuerst dargebotene Routenrichtung auch die Reihenfolge, in der Objekte aus der Umgebung genannt werden, wenn die räumliche Anordnung dieser Objekte mündlich beschrieben oder mit Karten nachgelegt werden soll. Diese Reihenfolge wird auch beibehalten, wenn die Route danach in anderer Richtung vorgeführt wurde. Hermann und Schweizer (1998) erklären die Ergebnisse im Sinne einer Repräsentation in Form eines Wissensnetzwerks mit Knoten und Kanten: Die Knoten sind bestimmte Objekte an einem bestimmten Ort in der Umwelt, die

Kanten bilden die Verbindungen zwischen diesen Knoten. Zwei Orte AB sind dabei doppelt miteinander verbunden, einmal in Richtung A→B und ein weiteres Mal in Richtung B→A; die Stärke dieser beiden Verbindungen kann unterschiedlich sein (Hermann und Schweizer, 1998). Asymmetrien der Richtungsschätzungen sind im Rahmen dieses Modells denkbar, da Hin- und Rückrichtung zwischen zwei Orten getrennt gespeichert werden, allerdings sagt das Modell sie nicht zwingend voraus. In Herrmanns und Schweizers Versuchen hat die räumliche Information durch die Präsentationsweise eine starke Direktionalität. In der realen Umgebung bestehen dagegen normalerweise mehr Möglichkeiten, sich selbst bzw. seinen Kopf zu drehen; die Unterschiede zwischen Hin- und Rückrichtung wären damit nicht so ausgeprägt. Es bliebe noch zu untersuchen, ob unter solchen freieren Explorationsbedingungen ebenfalls ein Richtungseffekt auftritt. Hier kann vielleicht eine Parallele zu den Antworten der Platzzellen von Ratten im Olton-Labyrinth und im Open-field gezogen werden (siehe auch Abschnitt 2.7). Im Olton-Labyrinth, in dem die visuelle Information sehr stark richtungsabhängig ist, zeigt sich auch ein stark richtungsabhängiges Feuern der Platz-Zellen. Im Open-field, in dem sich die Ratte relativ ungehindert umherbewegen kann, ist das Feuern dieser Zellen dagegen vor allem ortsabhängig. Es läßt sich die Hypothese aufstellen, daß entsprechend beim Menschen der Richtungseffekt nur auftritt, wenn die sensorische Information selbst auch sehr richtungsabhängig war. In einer Umgebung, die frei erkundet werden kann, kommt man vielleicht zu anderen Ergebnissen. Überprüft werden könnte diese Hypothese durch Experimente mit einem Helmet-Mounted-Display, bei denen in einer Bedingung der Kopf frei bewegt werden kann, während in einer anderen Bedingung eine bestimmte Blickrichtung festgelegt ist (Translationsbewegungen könnten in beiden Fällen über eine Maus von der Versuchsperson gesteuert werden). Beim Nachlegen der räumlichen Anordnung der Objekte aus dem vorher gesehenen Film durch die Versuchspersonen mit Kärtchen zeigte sich in Hermanns und Schweizers Versuche gleichzeitig aber auch, daß aus den vorhandenen Informationen eine "Karte" rekonstruiert werden kann. Das Wissen der Umgebung könnte also an Routen gebunden sein, aus der Verknüpfung von Routen aber Kartenwissen erzeugt werden. Die Strategien, die Versuchspersonen nach eigener Angabe zur Lösung der Aufgabe verwendet wurden, sprechen für eine wichtige Rolle von Routen. Allgemein zeigen sich auch Unterschiede zwischen Versuchen, in denen das räumliche Wissen durch Karten oder direkten Kontakt mit der Umwelt erworbenen wurde (s. Abschnitt 2.6.2), was gegen eine Repräsentation des direkt in der Umgebung erworbenen Wissens in Kartenform spricht.

Es bleibt also festzuhalten, daß die Versuchspersonen metrisches Wissen von der Umgebung besitzen. Die bei den Richtungsschätzungen dennoch auftretenden systematischen Fehler können als Dislokationen und Misorientierungen beschrieben werden. Es gibt allerdings auch andere Erklärungsmöglichkeiten. Weitere Versuche wären nötig, um zwischen diesen Möglichkeiten zu unterscheiden. In einer virtuellen Umgebung könnte z.B. die Richtung, aus der der Weg zum fraglichen Ort aus dem Blickfeld verschwindet bei sonst konstant gehaltenen Bedingungen untersucht werden. Auch in bezug auf Vergrößerung des Fehlers bei längerem Weg oder mehr Wegbiegungen bei einem gleich langen Weg können in virtuellen Umgebung die fraglichen Parameter kontrolliert verändert werden. Auch könnte eine Karte, die von den Versuchspersonen die Positionierung der Orte auf einem leeren Blatt Papier erstellt wurde, mit einer hypothetischen Karte verglichen werden, in der die hier gefundenen Fehler durch Verschiebungen und Rotationen der einzelnen Orte relativ zu den anderen Orten minimiert wurden. Eine Übereinstimmung zwischen diesen beiden Karten würde die Hypothese von lokalen Misorientierungen und Dislokationen unterstützen.

5.3 Zeigen von Richtungen in einer virtuellen Umgebung

5.3.1 Einführung

Eine der Motivationen dieser Arbeit war die Untersuchung der Frage, ob Ergebnisse aus virtuellen Umgebungen auch auf reale Umgebungen übertragbar sind. Daher wurden die Versuche in möglichst ähnlicher Weise mit denselben Versuchspersonen wie in der realen Umgebung ebenfalls in einer entsprechenden virtuellen Umgebung durchgeführt. Es sollte beobachtet werden, wie die Versuchspersonen sich in dieser Testumgebung verhalten. Ein genauerer Vergleich der Schätzungen in den beiden Umgebungen und eine Beurteilung der Leistung bei dem Wissenstransfer von der realen in die virtuelle Umgebung soll erst in Abschnitt 5.4 getroffen werden. Die Ergebnisse aus der virtuellen Umgebung wurden auf dieselbe Weise wie die Ergebnisse aus der realen Umgebung ausgewertet.

5.3.2 Ergebnisse

- Verteilung der Richtungsfehler

Die Fehlerwerte lagen in einem Bereich von -80° bis 79.25° (Abb. 15). Die Verteilung ist dem Augenschein nach unimodal und annähernd symmetrisch. Die Standardabweichung der Richtungsfehler aller Versuchspersonen beträgt 17.0°. Der entsprechende Mittelwert über alle Fehlerbeträge liegt bei 12.9 ± 0.3°. Der Fehler ist damit im Durchschnitt um etwa 2° größer als in der realen Welt. Auch in dieser Umgebung liegen Fehler weit unter den Werten, die durch Zufall zu erwarten wären (siehe auch 5.2.2). Der Mittelwert über die Richtungsfehler aller Versuchspersonen liegt bei -0.3 ± 0.5° (Tab. 8) und weicht nicht signifikant von 0° ab ($t(1024) = -0.58$, $p = 0.56$). Im Mittel finden sich also keine systematischen Abweichungen. Die Standardabweichungen der Richtungsfehler liegen bei den verschiedenen Versuchspersonen zwischen 13.3° und 20.1° (MWdFB zwischen 9.3° und 16.5°). Die Mittelwerte der Richtungsfehler der einzelnen Versuchspersonen zeigen (im Gegensatz zu der Gesamtverteilung) in 6 Fällen (ado, aja, and, chb, kas, uls) einen relativ deutlichen systematischen Fehler. Dieser liegt jedoch bei drei der Versuchspersonen in Richtung des Uhrzeigersinns, bei den drei anderen Versuchspersonen entgegen dem Uhrzeigersinn. Es zeigt sich im Ganzen dennoch, ähnlich wie in der realen Welt, eine sehr große Genauigkeit der Schätzungen. Es stellt

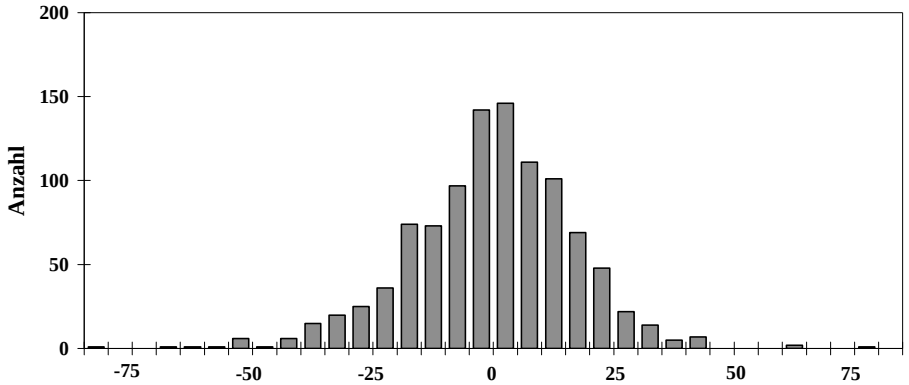

Abb. 15: Häufigkeit der Fehler in 5°-Schritten für alle Orte und Richtungen bei allen zehn Versuchspersonen in der virtuellen Umgebung (N=1025).

Vp	*MW*	*SE*	*SD*	*MWdFB*
abu	-0.84	1.68	17.1	13.4
ado	-6.98	1.98	20.1	16.5
aja	3.29	1.84	18.6	15.1
and	-4.58	1.54	15.6	11.3
chb	-4.33	1.75	17.4	13.4
kas	4.17	1.49	15.1	11.8
mat	-0.78	1.31	13.3	10.0
ssh	-1.86	1.50	15.2	11.6
uls	7.26	1.73	17.6	14.4
vlb	1.42	1.43	14.5	9.3
alleVp	-0.3	0.5	17.0	12.9

Tab. 8: Mittlerer Richtungsfehler in Grad (MW), dazugehörige Standardfehler (SE), Standardabweichungen (SD) und Mittelwerte der Fehlerbeträge (MWdFB) als Maß für die Größe des Fehlers für die einzelnen Versuchspersonen (Vp) in der virtuellen Umgebung. In der letzten Reihe (alle Vp) sind die entsprechenden Werte für die Gesamtverteilung angegeben.

sich die Frage, ob die in dieser Umgebung gefundenen Fehler ebenfalls wieder als eine Kombination von lokalen Verzerrungen und zufälligem Fehler erklärt werden können.

- Systematische Fehler

Um auch in dieser Umgebung der Frage nach dem Vorkommen und den Ursachen von systematischen Fehlern nachzugehen, wurden die Fehler wiederum getrennt nach "Von"- und "Zu"-Fehlern analysiert (siehe auch Abschnitt 5.2.2 über systematische Fehler und Anhang D in bezug auf Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen). Einen gewissen Überblick über die von den verschiedenen Orten in die einzelnen Richtungen gemachten Fehler bietet Abb. 16. Auch in der virtuellen Umgebung zeigen sich Inkonsistenzen der Fehler in Hin- und Rückrichtung. So unterscheidet sich z.B. der Fehler Markt → Johanneskirche deutlich vom Fehler

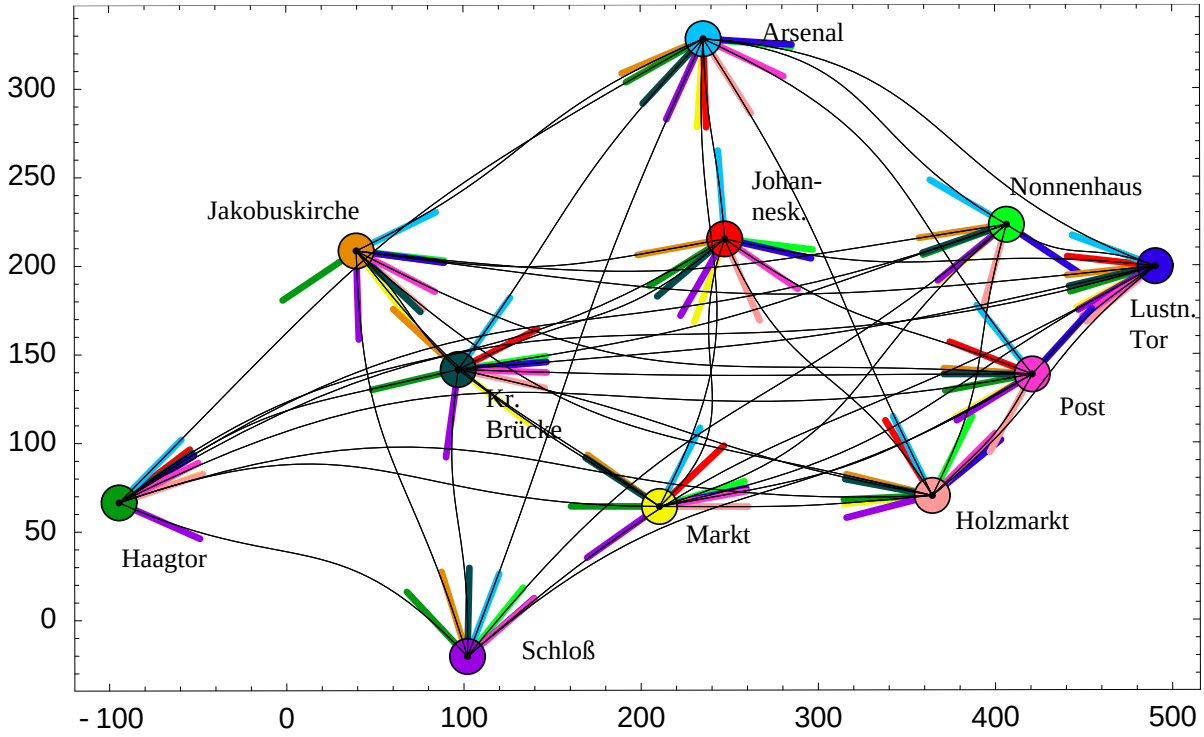

Abb. 16: Mittelwerte über die an jedem Standort zu den jeweils anderen Orten gezeigten Richtungen (n=10). Für eine Erklärung der einzelnen Elemente dieser Abbildung siehe Abb. 6.

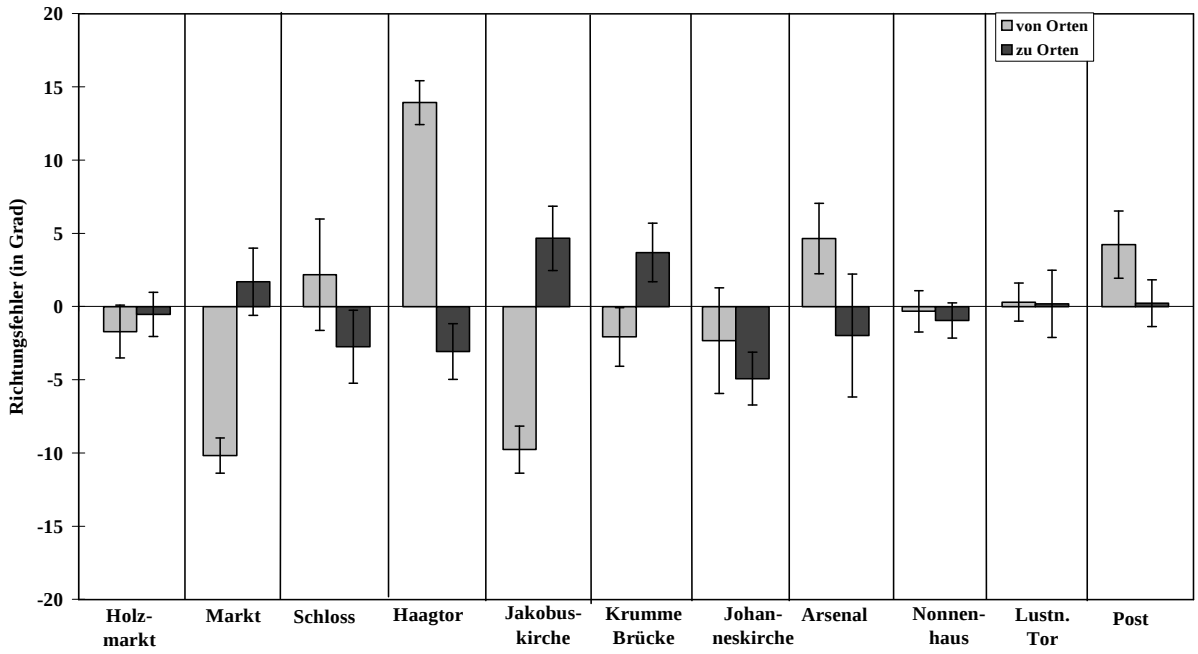

Abb. 17: Mittlere "Von"-Fehler (helle Balken) und "Zu"-Fehler (dunkle Balken) an den einzelnen Orten in der virtuellen Umgebung mit dazugehörigem Standardfehler (n=10).

Johanneskirche → Markt. Es zeigen sich ebenfalls deutliche Unterschiede in der Größe des "Von"-Fehlers an den verschiedenen Orten (Abb.17). Besonders ausgeprägte "Von"-Fehler finden sich wieder am Markt, am Haagtor und an der Jakobuskirche. Die "Zu"-Fehler sind wie in der realen Umgebung wesentlich kleiner und weniger variabel. Während sich bei den "Von"-Fehlern Werte zwischen -10.2° (Markt) und 13.9° (Haagtor) finden, liegen bei den "Zu"-Fehlern die Werte zwischen -4.9° (Johanneskirche) und 4.7° (Jakobuskirche).

Die Antworten der einzelnen Versuchspersonen können sich von diesen Mittelwerten unterscheiden; zumindest bei den drei genannten Orten mit großem "Von"-Fehler ist aber bei allen Versuchspersonen das Vorzeichen gleich (Anhang D.2). An einigen Plätzen werden große Fehler gemacht, die aber nicht zu einem ausgeprägten mittleren Richtungsfehler führen. Zu beobachten sind diese Fehler aber in den Standardabweichungen der mittleren Richtungsfehler oder den Beträgen von oder zu diesen Orten (Abb. 18). Dies ist z.B. am Schloß und am Arsenal der Fall. Die Mittelwerte über die Fehlerbeträge liegen bei den "Von"-Fehlern zwischen 7.6° (Lustnauer Tor) und 18.1° (Schloß), bei den "Zu"-Fehlern zwischen 10.5° (Krumme Brücke) und 15.8° (Nonnenhaus).
Wie auch in der realen Welt kann man untersuchen, ob die beobachteten Fehler durch systematische Verzerrungen einer mentalen Karte der Versuchspersonen von der Umgebung zustande gekommen sein könnten (siehe Abschnitt 5.2.2 in bezug auf Verzerrungstypen und deren erwartete Eigenschaften). Dabei finden sich auch in der virtuellen Umgebung keine Fehlermuster, die für eine globale Verzerrung sprechen (Abb. 16). Vielmehr scheint auch hier eine Interpretation der Fehler als Misorientierungen und Dislokationen zuzutreffen. Der große Unterschied zwischen "Von"- und "Zu"-Fehler am Markt, am Haagtor und an der Jakobuskirche spricht für eine Misorientierung dieser Orte in der kognitiven Karte der Versuchsperson. Auch wenn es aufgrund der Datenstruktur schwierig ist, definitive Aussagen zur Dislokation zu machen (siehe Abschnitt 5.2.2), so gibt es dennoch gewisse Hinweise für ein Vorkommen einer solchen Verzerrung an mehreren Orten. Aus einer Regression der mittleren Richtungs-

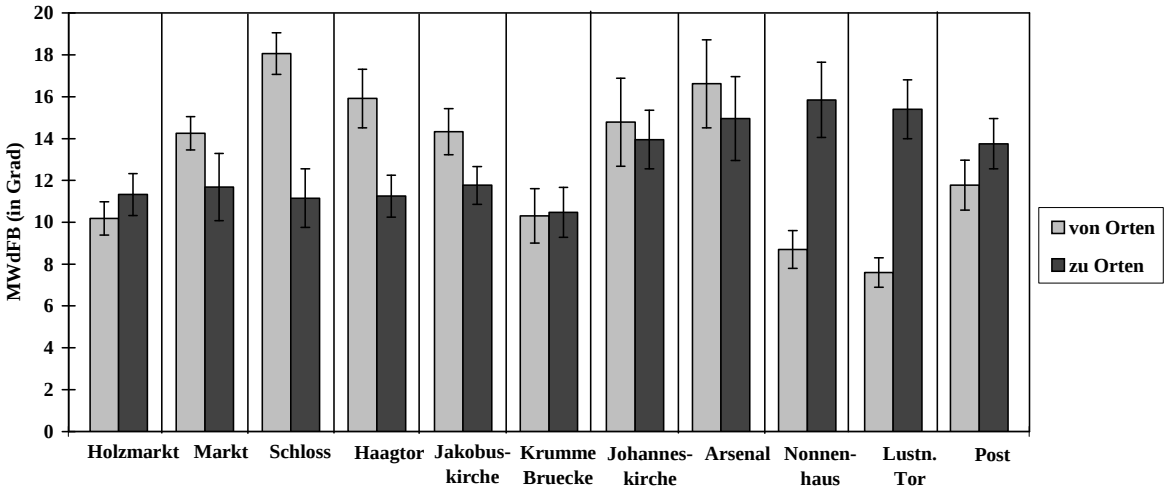

Abb. 18: Mittelwert der Fehlerbeträge von und zu den verschiedenen Orten. Die Werte wurden über alle Versuchspersonen (n=10) und möglichen Richtungen gemittelt.

schätzungen von und zu einzelnen Plätzen gibt es für das Haagtor Hinweise sowohl auf eine Dislokation als auch eine Misorientierung. Bei den mittleren Differenzbeträgen ergeben sich dagegen eher Hinweise für Johanneskirche, Krumme Brücke, Arsenal und Schloß.

- Eingesetzte Strategie

Die Versuchspersonen wurden nach ihrer Strategie beim Schätzen der Richtungen befragt, nachdem sie den Versuch in der virtuellen Umgebung durchgeführt hatten.

Dabei wurden folgende Strategien genannt:
- mentales Abgehen der Wege (alle Versuchspersonen), dabei Vergleich mehrerer möglicher Wege (ssh)
- spontanes Schätzen (abu)
- Vergleich mit vorher gezeigten Richtungen (chb)
- globales Einschätzen der Richtung über Bezugspunkte (kas)

Wie in der realen Welt gaben alle Versuchspersonen an, den Weg durch mentales Ablaufen der Wege geschätzt zu haben. Teilweise wurde angegeben, dabei eine perspektivische Konstruktion des Weges (kas) zu machen bzw. die "Diagonale des Weges" zu schätzen (vlb). Die Alternativstrategien unterscheiden sich etwas von den in der realen Welt genannten; insgesamt werden weniger genannt. Diese Einschätzung könnte aber auch in gewissem Maß durch die subjektiven Gruppierung der frei formulierten Aussagen beeinflußt worden sein oder ein anderes Antwortverhalten der Versuchspersonen beim nochmaligen Beantworten dieser Frage.

- Übrige Analysen

a) Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Versuchspersonen

Die Größe der Richtungsfehler, wie sie aus den Standardabweichung ersichtlich ist, ist zwischen Frauen und Männern signifikant verschieden (t-Test unter Annahme gleicher Varianzen; $t(8) = 2.4$, $p < 0.05$). Bei den Frauen beträgt die mittlere Standardabweichung $17.7 \pm 0.8°$

auf, bei den Männer 15.2 ± 0.7° (Abb. 19). Aufgrund der geringen Versuchspersonenzahl sollten aber keine weitgehenden Schlüsse in bezug auf Unterschiede zwischen Frauen und Männern gezogen werden.

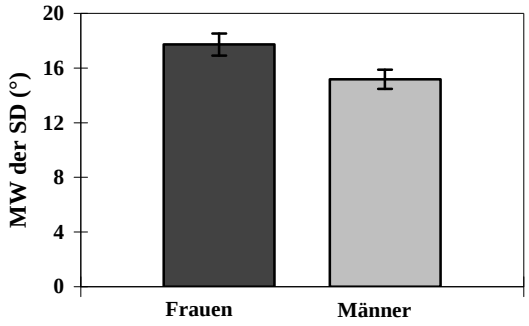

Abb. 19:
Die Abbildung zeigt die Mittelwerte und Standardfehler über die Standardabweichungen der Frauen (dunkler Balken, n=5) und die der Männer (heller Balken, n=5).

b) Lerneffekte

Die mittleren Fehlerbeträge der einzelnen Versuchspersonen von bestimmten Orten wurden nach der Reihenfolge gruppiert, in der die einzelnen Versuchspersonen von diesen aus Richtungen geschätzt hatten. Daraus lassen sich ersehen, ob sich die Versuchspersonen im Laufe des Versuches verbessert haben, d.h. ob ein Lernen stattgefunden hat. Der Mittelwert über die Fehlerbeträge am zuerst aufgesuchten Ort ist mit 13.9 ± 1.5° zwar geringfügig größer als am zuletzt aufgesuchten Ort mit 12.7 ± 1.4° (n=10), es läßt sich aber kein eindeutiger Trend feststellen (Abb. 20). Für die Einstellung auf die neue Versuchsumgebung und Abfragemodalität scheint die kurze Phase, in der die Versuchspersonen sich anhand einer Probeaufgabe mit ihnen vertraut machen konnten, ausreichend zu sein. Die Versuchsumgebung erlaubte es nicht,

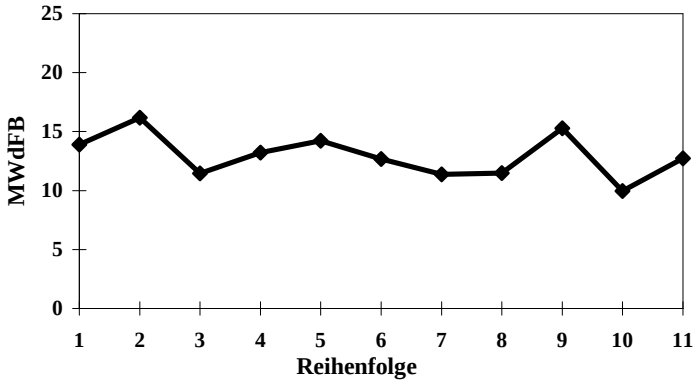

Abb. 20: Mittelwerte der Fehlerbeträge (MWdFB) aller Versuchsperson (n=10) der jeweils an erster bis elfter "Stelle" auf der Leinwand dargebotenen Orte.

einen räumlichen Zusammenhang zwischen den Orten zu lernen. In dieser Hinsicht ist also in der virtuellen Umgebung von vornherein kein Lerneffekt zu erwarten. In einer virtuellen Rekonstruktion der Tübinger Innenstadt, wie sie momentan am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik aufgebaut wird (Virtuelles Tübingen), wird dagegen das Lernen von räumlichen Beziehungen zwischen den Orten ebenfalls möglich sein und ein Lerneffekt könnte eventuell auftreten.

c) Andere Faktoren

Anhand der Einstufung der Vertrautheit mit den einzelnen Orte aus dem Fragebogen in der realen Welt wurde auch in der virtuellen Umgebung der Zusammenhang zwischen dem persönlichen Bekanntheitsgrad der einzelnen Orte und der Größe der Schätzfehler untersucht.

Die von den einzelnen Versuchspersonen gemachten Fehler sind an den Orten am geringsten, die sie nach ihrer eigenen Angabe am besten kennen (Einstufung 1: 11.2 ± 0.4°). Danach scheint sich ein leicht steigender Trend abzuzeichnen (bis zu Einstufung 4 mit 18.4 ± 1.6°), der sich in der letzten Kategorie aber wieder umkehrt (Abb. 21).

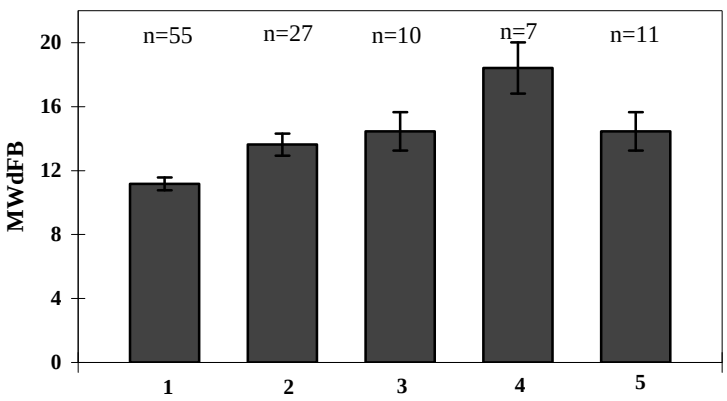

Abb. 21: Effekt der Vertrautheit mit den Orten auf die mittleren Fehlerbeträge der Schätzungen (vergleiche auch Abb. 14).

Die Versuchspersonen wurden auch danach gefragt, was sie als Unterschied zwischen dem Versuch in der virtuellen Versuchsumgebung und in der realen Welt empfunden haben. Die meisten Versuchspersonen fanden den Versuch in der virtuellen Umgebung schwieriger, drei empfanden den Versuch als sehr ähnlich, eine Versuchsperson fand den Versuch in der virtuellen Umgebung sogar einfacher (ado). Als ein Unterschied zwischen den beiden Umgebungen wurde die ungewohnte Bewegungsweise genannt. Die visuelle Information war geringer als in der realen Welt. Dabei wurden speziell das eingeschränkte Gesichtsfeld und die geringere Schärfe des Bildes bemängelt. Ein Gesichtsfeld von 180° x 50° ist gegenüber den natürlichen Bedingungen, in denen auch die Möglichkeit zu Kopfbewegungen besteht, immer noch eingeschränkt. Auch durch die konstante Kamerahöhe geht Information verloren. Außerdem wurde die Zweidimensionalität des Bildes als Unterschied empfunden; das virtuelle Modell von Tübingen könnte dagegen auch in Stereo dargeboten werden. Durch den Abstand zur Leinwand fehlte den Versuchspersonen Information am Fußboden in bezug auf ihren eigenen, genauen Standpunkt.

5.3.3 Diskussion

Es zeigt sich eine hohe Genauigkeit der Schätzungen auch in der virtuellen Umgebung. In den Richtungsschätzungen zeigen sich systematische Fehler. Der Mittelwert über alle Richtungsfehler weicht zwar nicht von 0° ab, aber bei einzelnen Versuchspersonen sind die Abweichungen stärker als in der realen Umgebung. Es finden sich auch wieder systematische Fehler an den verschiedenen Orten. Insbesondere bei den "Von"-Fehlern zeigen sich große Werte (Abb. 17). Diese systematischen Fehler können als Dislokationen und Misorientierungen der Orten in einer metrischen Repräsentation der Versuchspersonen von der Umwelt interpretiert werden. Wie schon in der Diskussion der Ergebnisse in der realen Welt ausgeführt (Abschnitt 5.2.3), ist diese Interpretation nicht die einzig mögliche, sondern es gibt auch alternative Erklärungsansätze. Diese sind für die reale und virtuelle Umgebung gleich. Auch in der virtuellen Umgebung spricht einiges wieder dafür, daß eine Karte erst im Laufe der Aufgabe von den Versuchspersonen aus einer anderen Repräsentationsform rekonstruiert wird. Diese zu-

grunde liegende Repräsentation enthält zwar metrische Information, die zu der Rekonstruktion einer Karte nötig ist, hat aber selbst nicht die Form einer Karte. Auch die Aussagen der Versuchspersonen über die verwendeten Strategien sprechen eher für eine solche Repräsentation, die ihre Information für die Schätzungen aus der Verknüpfung von Wegen gewinnt, die mental visualisiert werden. Im Verhalten der Versuchspersonen zeigt sich eine starke Ähnlichkeit in den Vorgehensweisen in der realen und der virtuellen Welt. So dreht Versuchsperson abu in der Laborumgebung das Bild der Umwelt (entsprechend der Vorgehensweise in der realen Welt) zunächst so lange, bis der Zeiger in etwa in Richtung des gedanklich verfolgten Weges weist. Anschließend zeigte sich wieder ein Folgen des mental abgegangenen Weges mit dem Zeiger (d.h. das Bild der Umwelt wurde entsprechend gedreht). Von mehreren Versuchspersonen wurde dabei das Nachverfolgen der Wege in der virtuellen Umgebung aufgrund der oben beschriebenen Unterschiede zur realen Umgebung als etwas erschwert bzw. als "abstrakter" (kas) empfunden.
Insgesamt zeigen sich sowohl in den Richtungsfehlern als auch in der Vorgehensweise der Versuchspersonen in der virtuellen Umgebung starke Ähnlichkeiten mit den Versuchen in der realen Welt. Daher kann man wohl davon ausgehen, daß in beiden Umgebungen auf dieselbe Repräsentation zurückgegriffen wurde und dieselben Strategien zur Beantwortung der Frage herangezogen wurden. Allerdings wurden von den Versuchspersonen wahrscheinlich noch zusätzliche Strategien angewendet, um den empfundenen Unterschied zwischen realer und virtueller Umgebung zu überbrücken. Wie stark die Ähnlichkeit zwischen den beiden Umgebungen ist bzw. wo vielleicht dennoch Unterschiede bestehen, soll im nächsten Abschnitt genauer beschrieben werden.

5.4 Vergleich von realer und virtueller Umgebung

5.4.1 Einführung

Ergebnisse aus virtuellen Umgebungen können in bezug auf die maßgebenden Parameter der Umgebung interpretiert werden, wie Ergebnisse unter anderen Laborbedingungen auch. Mit dem verstärkten Einsatz von virtuellen Umgebungen stellt sich jedoch eine zusätzliche Frage. Virtuelle Umgebungen können teilweise sehr realistisch wirken. Sind sie aber auch in dem Maße realistisch, daß man Ergebnisse aus einer virtuellen Umgebung auf die reale Welt übertragen kann, d.h. daß man in der realen Welt dieselben oder zumindest ähnliche Ergeb-

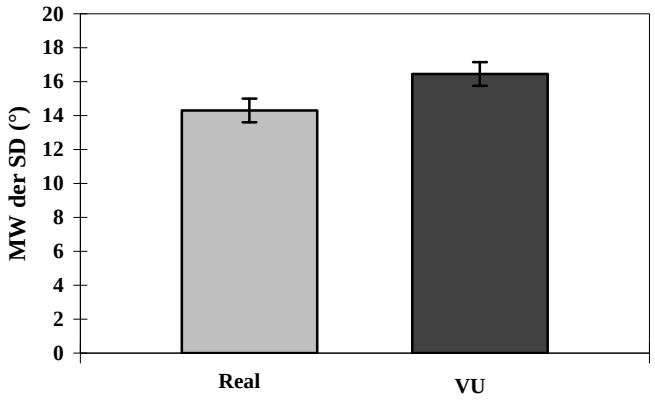

Abb. 22: Mittelwerte über die Standardabweichungen der einzelnen Versuchspersonen (n=10) in der realen (Real) und der virtuellen Umgebung (VU) mit zugehörigem Standardfehler.

nisse wie in der virtuellen Welt erhält? Dieser Frage soll hier nachgegangen werden. Im vorhergehenden Abschnitt wurde schon festgestellt, daß in den hier durchgeführten Experimenten die Ergebnisse in beiden Umgebungen sehr ähnlich sind. Im folgenden Abschnitt soll nun genauer untersucht werden, wie weit diese Ähnlichkeit geht und wo eventuelle Unterschiede liegen. Wie vorher schon erläutert können virtuelle Welten sehr verschieden aussehen. Daher ist auch zu erwarten, daß in unterschiedlichen virtuellen Welten unterschiedliche Ergebnisse auftreten. Diese Versuche können also die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität zunächst nur in einem eng begrenzten Rahmen beantworten, nämlich in Bezug auf die konkrete Aufgabe und die spezielle virtuelle Umgebung. Erst in Zusammenhang mit anderen, ähnlichen Vergleichen kann ein allgemeines Bild entstehen.

5.4.2 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse aus der realen und der virtuellen Umgebung direkt gegenübergestellt und verglichen werden. Überschneidungen mit den vorherigen Abschnitten sind daher teilweise unvermeidbar.

- Verteilung der Richtungsfehler

In der realen Welt beträgt der Mittelwert über die Standardabweichungen der einzelnen Versuchspersonen 14.3 ± 0.7°, in der virtuellen Umgebung 16.45 ± 0.7° (n=10). Die Richtungen werden in der virtuellen Umgebung im Vergleich zu der realen Welt also um etwa 2° schlechter geschätzt (Abb.22). Der Unterschied zwischen diesen beiden Werten ist signifikant (t-Test mit abhängigen Stichproben, $t(9) = -4.1$, $p < 0.01$).
Eine systematische Abweichung des mittleren Richtungsfehlers von 0° der einzelnen Versuchspersonen findet sich bei allen Versuchspersonen in der virtuellen Umgebung wieder und ist in dieser häufig deutlich größer (vergleiche Tab. 5 und 8). Diese stärkere Abweichung der Mittelwerte der einzelnen Versuchspersonen von 0° könnte die Ursache für die größere Standardabweichung der Gesamtverteilung der Richtungsfehler in der virtuellen Umgebung sein. Dies scheint aber nicht der Fall zu sein. Die Standardabweichung der Gesamtverteilung ist zwar größer als der Mittelwert über die Standardabweichungen der einzelnen Versuchspersonen, dies gilt aber in ähnlichem Ausmaß sowohl für die reale als auch für die virtuelle Umgebung (Tab. 9). Der größere systematische Fehler bei den einzelnen Versuchspersonen in der virtuellen Umgebung führt also nicht zu dem größeren Fehler in der Gesamtverteilung.

	SD der Gesamtverteilung	*MW über SD der einzelnen Vp*
Real	14.5	14.3
VE	17.0	16.5

Tab. 9: Standardabweichung der Gesamtverteilung (erste Spalte) in der realen Umgebung (n=1030) und der virtuellen Umgebung (n=1025) im Vergleich zum Mittelwert über die Standardabweichungen der einzelnen Versuchspersonen (zweite Spalte) in den beiden Umgebungen (n=10).

- Systematische Verzerrungen

Bei einem direkten Vergleich der "Von"- und "Zu"-Fehler an den verschiedenen Orten in der realen und der virtuellen Umgebung sieht man, daß die Fehler in beiden Umgebungen außerordentlich ähnlich sind (Abb. 23). Aus den jeweiligen Standardfehlern ist zu entnehmen, daß

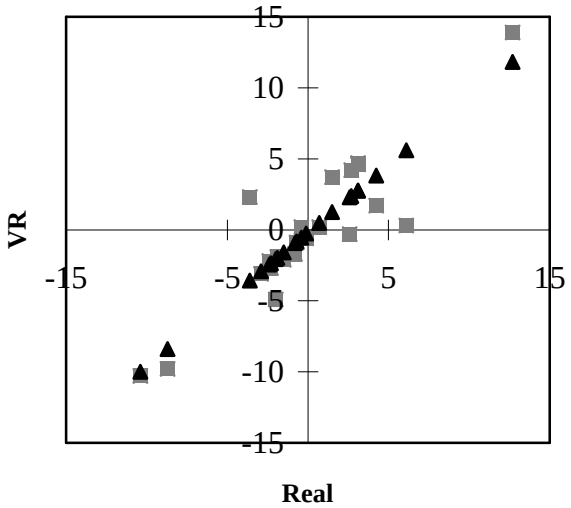

Abb. 24: Regression der mittleren "Von"-Fehler in der realen und der virtuellen Umgebung. Die Originaldaten sind als graue Kästchen dargestellt, die durch die Regression vorhergesagten Punkte als schwarze Dreiecke.

abgesehen von einer Ausnahme ("Von"-Fehler am Lustnauer Tor) kein signifikanter Unterschied zwischen den jeweiligen Werten in der realen und der virtuellen Umgebung auftritt. Eine 3-faktorielle Anova (2 Umgebungen x 11 Orte x 2 Richtungen: "Von"- und "Zu"-Fehler) mit den mittleren Richtungsfehlern der zehn Versuchspersonen unter den genannten Bedingungen als abhängiger Variablen wurde durchgeführt. Dabei findet sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Versuchsumgebungen ($F(1,9) = 0.01$; $p = 0.91$). Der Fehler in der virtuellen Umgebung läßt sich anhand des Fehlers in der realen Umgebung vorhersagen. Eine Regression der Von- und Zu-Fehler in beiden Umgebungen paßt eine Gerade an, die etwa durch den 0-Punkt verläuft und annähernd Steigung von 1 besitzt (Fehler in der virtuellen Umgebung = 0.9 * (Fehler in der realen Umgebung) - 0.2; $p < 0.001$; Abb. 25). Die Interaktion von Umgebung und Ort ($F(10,90) = 0.90$, $p = 0.54$) und die von Umgebung und

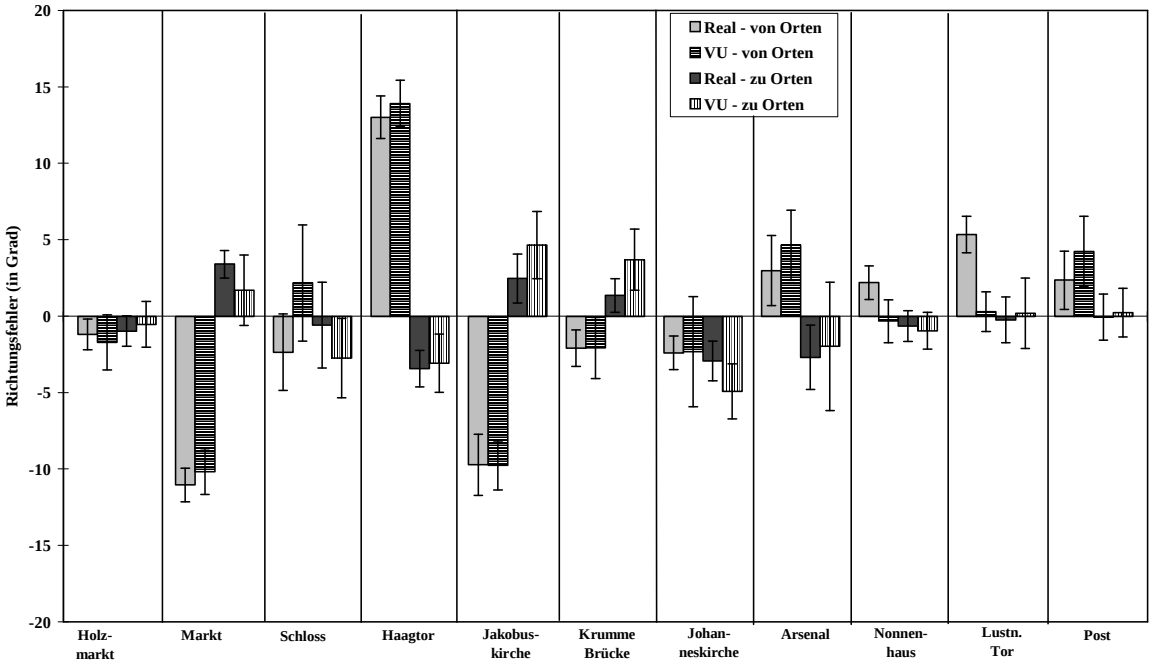

Abb. 23: In der Abbildung wurden die Von- und Zu-Fehler in der realen und der virtuellen Umgebung nebeneinandergestellt. Es sind jeweils die Mittelwerte über die mittleren Richtungsfehler der 10 Versuchspersonen für die verschiedenen Bedingungen mit zugehörigem Standardfehler dargestellt.

Richtung ($F(1,9) = 1.34$, $p = 0.28$) sind nicht signifikant. Dies deutet ebenfalls darauf hin, daß die Fehler in der realen und der virtuellen Umgebung ähnlich sind (oder zumindest nicht signifikant unterschiedlichen). Der Unterschied zwischen den verschiedenen Orten ist dagegen hoch signifikant, wie schon in Abschnitt 4.2.2. und 4.3.2 besprochen wurde ($F(10,90) = 7.06$, $p < 0.001$). Es zeigt sich auch ein signifikanter Unterschied zwischen "Von"- und "Zu"-Fehlern ($F(1,9) = 5.54$; $p < 0.05$). Dies stimmt mit einer systematischen Verzerrungen einer Karte als Ursache der Fehler überein, da nach diesem Erklärungsansatz Unterschiede in "Von"- und "Zu"-Fehlern erwartet werden. Die Interaktion zwischen Ort und Richtungen ist hoch signifikant ($F(10,90) = 16.42$; $p < 0.001$). Dies kann als Hinweis auf unterschiedlichen Verzerrungstypen (Misorientierung, Dislokation) an den verschiedenen Orten interpretiert werden. Die Interaktion zwischen allen drei Bedingungen ist nicht signifikant ($F(10,90) = 1.28$, $p = 0.26$).
Die Verteilung der systematischen Fehler ist also in der realen und der virtuellen Umgebung praktisch identisch. Die Fehler in der virtuellen Umgebung sind zwar signifikant größer als in der realen Umgebung, die Charakteristika der Fehler bleiben jedoch gleich.

- Konstanz der Richtungsschätzungen in den beiden Umgebungen

Im vorigen Abschnitt wurde dargestellt, wie sich die Mittelwerte der "Von" und "Zu"-Fehler an den verschiedenen Orten in der realen und virtuellen Umgebung zueinander verhalten. In diesem Abschnitt soll eine solche Auswertung auch auf der Ebene der Einzelwerte durchgeführt werden. Wie bei der Untersuchung der Konstanz der Richtungsfehler über die Zeit (Abschnitt 5.2.2), sollen hier entsprechend Differenzen zwischen den in der realen und der virtuellen Umgebung gezeigten Richtungen gebildet werden. Es wurden jeweils die Differenzen zwischen den korrespondierenden Richtungsschätzungen der jeweiligen Versuchsperson in der realen und der virtuellen Umgebung gebildet (Differenzfehler = Richtungsfehler in der realen Umgebung - Fehler vom gleichen Ort und in die gleiche Richtung in der virtuellen Umgebung).
Es lassen sich wie bei der Konstanz über die Zeit wieder zwei Hypothesen aufstellen, die eine unterschiedliche Voraussage für die Standardabweichung der Differenzfehler machen. Ist der Fehler in beiden Umgebungen voneinander unabhängig, d.h. ist der systematische Fehler in der virtuellen Umgebung ein anderer als in der realen Umgebung, sollte die erwartete Standardabweichung der Differenzfehler $\sqrt{2}$mal so groß wie der Mittelwert der Standardabweichungen in der realen und der virtuellen Umgebung sein. In diesem Fall wären dies 21.8° (Mittelwert über die Standardabweichung der einzelnen Versuchspersonen). Werden die in der realen Welt gemachten Fehler dagegen in der virtuellen Umgebung reproduziert, sollten alle Differenzfehler und damit auch deren Standardabweichung 0° betragen. Zieht man die Ergebnisse bei der Wiederholung des Versuches in der realen Welt mit in Betracht, sollte diese Erwartung allerdings etwas modifiziert werden. Bei einer Wiederholung der Versuche in der realen Welt zeigte sich bei den Versuchspersonen ein systematischer und ein stochastischer Fehleranteil. Es ist wenig wahrscheinlich, daß dieser stochastische Fehleranteil zwischen den beiden Umgebungen geringer sein sollte als in der bei der zweimaligen Durchführung des Versuches in der realen Welt. Greifen die Versuchspersonen in beiden Umgebungen also auf dieselbe Repräsentationen und Strategien zurück, so sollte eher eine Standardabweichung in etwa derselben Höhe wie für die Konstanz in der realen Umgebung erwartet werden.
Die Standardabweichung der Differenzfehler ist von zwei Ausnahme abgesehen (uls, aja) bei allen anderen Versuchspersonen kleiner als der Mittelwert der Standardabweichungen in rea-

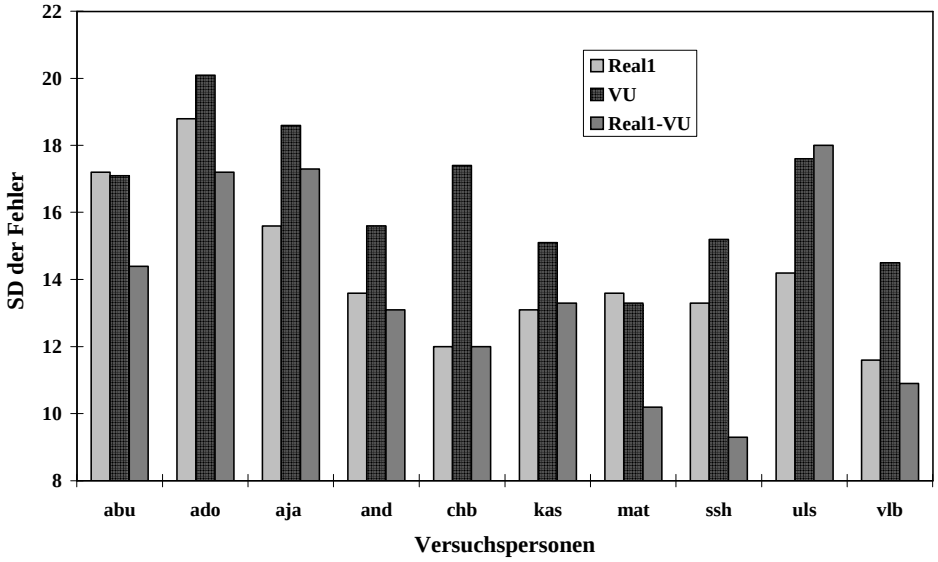

Abb. 25: SD des Richtungsfehlers in der realen (hellgraue Balken) und der virtuellen Umgebung (dunkelgraue Balken) und der Differenzen (mittelgraue Balken).

ler und virtueller Umgebung (Abb. 25 oder vergleiche Tab. 1 und 3). Bei allen Versuchspersonen liegt die Standardabweichung der Differenzfehler zwischen den Erwartungswerten der beiden Hypothesen, wie dies auch schon bei der Konstanz über die Zeit der Fall war. Dementsprechend liegt auch der Mittelwert über alle Versuchspersonen zwischen diesen beiden Extremen. Bei einer mittleren Standardabweichung von 14.3 ± 0.7° in der realen Welt und 16.5 ± 0.7° in der virtuellen Umgebung findet man für die Standardabweichung der Differenzen (Real1-VU) einen Wert von 13.6 ± 1.0°, also zwischen den nach den Hypothesen erwarteten 0° und 21.8° (Abb. 26). Im Vergleich dazu ist die mittlere Standardabweichung bei der Konstanz über die Zeit in der realen Welt mit 11.4 ± 0.5° etwas geringer. Beim Vergleich der Richtungsschätzungen in der virtuellen Umgebung mit der zweiten Durchführung des Versuches in der realen Welt ergeben sich gegenüber der ersten Durchführung so gut wie keine Unterschiede (Real2-VU 13.8 ± 1.8°, Real2 14.5 ± 1.9°).
Vergleicht man die Standardabweichung der Differenzfehler zwischen den beiden Umgebungen mit der innerhalb der realen Welt (Real1-Real2), so ist erstere nur geringfügig größer. Es werden also in der virtuellen Umgebung in etwa dieselben systematischen Fehler gemacht.

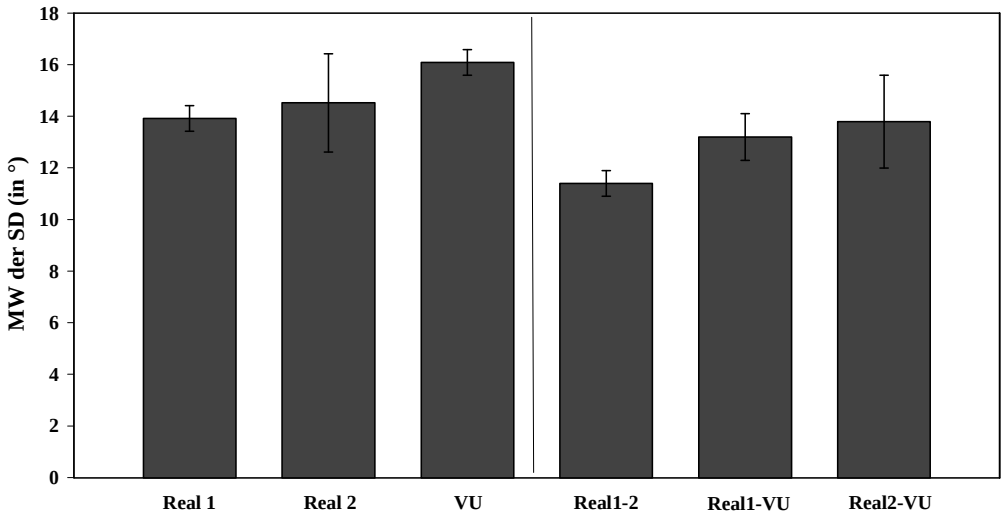

Abb. 26: Mittelwerte über die Standardabweichungen der Versuchspersonen in der realen Umgebung (erste Durchführung = Real1, zweite Durchführung = Real2), VU, und Standardabweichungen der jeweiligen Differenzfehler (n=10, bei Real2 n=4).

Der stochastische Anteil ist zwischen den beiden Umgebungen allerdings etwas größer. Auch diese Form der Auswertung, in der die Einzelschätzungen ein starkes Gewicht haben, bestätigt die schon im Vergleich der mittleren "Von"- und "Zu"-Fehler festgestellte Ähnlichkeit der beiden Umgebungen.

- Übrige Analysen

Außerdem wurden die Versuchspersonen nach ihrer Erfahrung mit virtuellen Umgebungen gefragt. Diese Erfahrung könnte eventuell einen Einfluß darauf haben, wie problemlos sich die Versuchspersonen auf diese neue Umgebung einstellen können. Versuchspersonen mit Erfahrung mit künstlichen Welten machten in der virtuellen Umgebung im Durchschnitt um $1.7 \pm 0.5°$ (n=5), Versuchspersonen ohne solche Erfahrung um $2.6 \pm 0.9°$ (n=5) größere Fehler als in der realen Umgebung. Dieser Unterschied ist aber nicht signifikant (t-Test: $t(8) = 0.8$, $p = 0.4$).

5.4.3 Diskussion

Die Ergebnisse in der realen und der virtuellen Umgebung sind sich in unseren Versuchen sehr ähnlich. Zwar sind die Fehler in der virtuellen Umgebung im Durchschnitt um etwa 2° größer, die Muster der systematischen Fehler stimmen in beiden Umgebungen aber in hohem Maße überein. Auch die verwendeten Strategien - soweit aus den Angaben der Versuchspersonen und ihrem Verhalten ersichtlich - scheinen mehr oder weniger identisch zu sein. Es läßt sich also in unseren Versuchen insgesamt eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen realer und virtueller Umgebung feststellen. In diesen Versuchen hatten die Versuchspersonen ihr Wissen in einer realen Umgebung erworben und mußten es anschließend sowohl in der realen als auch in einer virtuellen Version dieser Umgebung anwenden. Das im täglichen Umgang mit der Umgebung erworbene räumliche Wissen befähigte die Versuchspersonen zur Lösung der Aufgabe in der realen Welt und konnte von ihnen auch in der Situation im Labor angewendet werden. Bei Versuchen anderer Experimentatoren finden sich zum Teil bei unterschiedlichen Aufgaben ebenfalls ähnliche Ergebnisse in realen und virtuellen Umgebungen, zum Teil aber auch Unterschiede zwischen diesen.
In bezug auf Richtungsschätzungen zeigen sich teilweise gleichfalls ähnliche Genauigkeiten in den virtuellen Umgebung wie in der realen Welt, teilweise sind diese aber auch deutlich schlechter. In Versuchen von Ruddle et al. (1997) wurde eine virtuelle Umgebung nach einem Gebäude modelliert, in dem Thorndyke und Hayes-Roth (1982) Versuche durchgeführt hatten. Ruddle et al. fanden in ihren Experimenten in der virtuellen Umgebung einen mittleren Richtungsfehler von etwa 30°, Thorndyke und Hayes-Roth in der realen Welt einen Fehler von etwa 25° bei Versuchspersonen, die das Gebäude erst eine relativ kurze Zeit kannten. In Versuchen von Henry (1992) sind die Richtungsfehler in einem realen Gebäude mit einem einfachen Grundriß und dessen virtuellem Modell unter drei verschiedenen Interaktionsbedingungen etwa gleich; allerdings ist die Varianz in den virtuellen Umgebungen signifikant größer. In den hier durchgeführten Experimenten sind die Fehler in der realen Welt sehr klein. Dadurch sind die Richtungsschätzungen sehr sensitiv auch für kleine Änderungen durch Einfluß der Versuchsumgebung. So zeigt sich bei uns zwar ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Umgebungen, absolut gesehen ist dieser jedoch sehr klein. In anderen Experimenten in virtuellen Umgebungen liegen die Schätzungen nahe an den durch Zufall erwarteten Werten. So machen die Versuchspersonen unter einigen Versuchsbedingungen in virtu-

ellen Umgebungen mittlere Fehler von etwa 80° (Satalich, 1995; Wilson et al., 1997). Dazu sollte allerdings angemerkt werden, daß bei geringer Vertrautheit einer Umgebung oder bei einem sehr komplexen Grundriß auch in einer realen Umgebung Richtungsschätzungen nahe an den durch Zufall erwarteten Werten liegen können bzw. Übersichtswissen sehr gering sein kann (Goldin und Thorndyke, 1982; Moeser, 1986).
Die jeweilige Gestaltung der virtuellen Umgebung könnte eine entscheidende Rolle dabei spielen, wie die Ergebnisse ausfallen, insbesondere wie mit der virtuellen Umgebung interagiert wird und wieviel und welche Art von Information in dieser vorhanden ist. Die hier verwendete virtuelle Umgebung war in hohem Maß fotorealistisch und wurde mit einem großen visuellen Feld dargeboten. Viele andere virtuelle Umgebungen sind wesentlich einfacher, d.h. sie weisen weniger visuelle Details und ein kleineres visuelles Feld auf. Es gibt Hinweise darauf, daß ein kleines visuelles Feld den Erwerb von räumlichem Wissen erschwert; dabei geht es allerdings meist um extrem kleine visuelle Felder wie 9° und 14°, aber auch bei 60° ist noch ein Nachteil gegenüber uneingeschränkten Sichtbedingungen festzustellen (Alfano und Michel, 1990). Eventuell könnte auch eine Inkonsistenz zwischen der tatsächlichen Größe des visuellen Feldes, das durch die Größe der Projektionsfläche und Abstand der Versuchsperson zu dieser bedingt ist, und dem geometrischen Gesichtsfeld eine Ursache für Probleme sein. Mit dem geometrischen Gesichtsfeld ist dabei der Ausschnitt der virtuellen Umgebung gemeint, der vom Computer wie bei einem Blick durch eine Kameralinse als Bild generiert wird. In unseren Versuchen stimmten die beiden Gesichtsfelder überein - Fehler unserer Versuchspersonen können also nicht mit diesem Faktor zusammenhängen -, in vielen anderen Versuchen ist dies aber nicht der Fall (Ruddle et al., 1997; Colle und Reid, 1998; Péruch et al., 1997). Wie man an guten Leistungen der Versuchspersonen in Versuchen mit solchen Widersprüchen sieht, muß dies aber nicht unbedingt zu Problemen führen (Ruddle et al., 1997). Ein anderer Faktor, der die Leistungen von Versuchspersonen in virtuellen Umgebungen beeinflussen könnte, ist das Vorhandensein bzw. das Fehlen von kinästhetischer Information wie vestibulären Reizen oder anderer bewegungsabhängiger Information. Vestibuläre Information kann z.B. über Verwendung eines Head-Mounted-Displays und gleichzeitigem Verfolgen der Kopfposition der Versuchsperson dargeboten werden. Allerdings müssen mit diesem Interface in der Regel ein kleineres visuelles Feld und geringere Auflösung in Kauf genommen werden. Die mit Head-Mounted-Displays erzielten Ergebnisse sind allerdings nicht in allen Fällen besser als bei Monitor-Experimenten (Henry, 1992; Waller et al., 1998, Allen und Singer, 1997). Allen und Singer (1997) führen dies für ihre Versuche auf mehr bzw. kompliziertere Gerätinteraktionen bei Einbindung des Head-Mounted-Displays zurück. Chance et al. (1998) finden dagegen einen Vorteil durch das Vorhandensein von kinästhetischer Informationen.
Bei einigen der Versuche in virtuellen Umgebungen kann eine zu kurze Lernphase vielleicht die Ursache der schlechten Leistung sein. So war bei den Versuchen von Satalich (1995) nicht sichergestellt, daß die Versuchspersonen auch alle Objekte tatsächlich bewußt wahrgenommen hatten, deren Richtung sie später einschätzen sollten. Vielleicht ist das Lernen in virtuellen Umgebungen für die Versuchspersonen unter Umständen schwieriger und geschieht langsamer. Ruddle et al. (1997) und auch Waller et al. (1998) fanden zumindest bei längeren Trainingszeiten in virtuellen Umgebungen mit der realen Welt vergleichbare Ergebnisse. Diese längeren Trainingszeiten könnten dadurch notwendig werden, daß die Versuchspersonen erst eine gewisse Zeit brauchen, sich an diese verhältnismäßig fremdartigen Umgebungen zu gewöhnen. Zumindest scheint vorherige Erfahrung mit Computerspielen den Erwerb räumlicher Information in virtuellen Umgebungen zu erleichtern (Singer et al., 1997).
Bei Bereitstellung von Orientierungshilfen in virtuellen Umgebungen - z.B. Angabe von Kompaßrichtungen, Landkarten, Gitterstrukturen oder Landmarken -, so verändern sich mit

diesen Hilfen die jeweiligen Strategien und Leistungen (Darken und Sibert, 1996). Vielleicht erwerben die Versuchspersonen erst einmal speziell auf diese andersartige Umgebung abgestimmte Strategien, die sie dann in Zukunft bei einer ähnlichen Versuchsumgebung ebenfalls anwenden können. Versuchspersonen verbessern sich während des hier durchgeführten Versuches nicht; die kurze Eingewöhnungsaufgabe war anscheinend ausreichend. Um festzustellen, ob vor allem die Lernphase in einer virtuellen Umgebung für die Versuchspersonen ein Problem darstellt, wäre in bezug auf die hier durchgeführten Versuche ein Umkehrversuch ratsam, bei dem die Lernphase in einem virtuellen Modell der Stadt Tübingen stattfindet und anschließend wiederum sowohl in der realen als auch in der virtuellen Umgebung Richtungen geschätzt werden sollen.

Ein kleiner Teil der Information scheint jedoch auch in unseren Versuchen in der virtuellen Umgebung zu fehlen, da dort der Betrag der Schätzfehler etwas größer ist. Es wurden schon einige häufig vorkommende Unterschiede zwischen realen und virtuellen Umgebungen im allgemeinen genannt. In dem hier durchgeführten Experiment sind in der realen Welt alle Sinnesmodalitäten angesprochen, während in unserer virtuellen Umgebung nur visuelle Information vorhanden ist. Das Bild auf der Leinwand ist dabei weniger scharf als die real wahrgenommene Umgebung bei Normalsichtigen. Auch Information über die Entfernung von Objekten ist in der virtuellen Umgebung nur eingeschränkt vorhanden, nämlich nur soweit diese aus 2D-Information erschließbar ist. Außerdem ist durch den Abstand der Leinwand die Welt am Boden unterbrochen. Das visuelle Feld ist zwar im Vergleich zu anderen Versuchen in virtuellen Umgebungen sehr groß, im Vergleich zur realen Welt ist es aber dennoch immer noch eingeschränkt. In der Horizontalen sind zwar 180° wie beim natürlichen Blickfeld vorhanden, in der realen Umwelt kann dieser Winkel jedoch durch schnelle Kopf- und Augenbewegungen erweitert werden. Das Verhalten einiger Versuchspersonen deutet darauf hin, daß es an Orten, an denen Wände einen großen Teil des visuellen Feldes einnehmen, in der virtuellen Umgebung im Vergleich zur realen Umgebung schwieriger sein könnte, Richtungen einzuschätzen. Die Versuchspersonen drehten in diesen Situationen das Bild der Umwelt häufiger, um eine bessere Einschätzung der vom Standort wegführenden Straßen zu gewinnen. Die Daten sind in bezug auf diese Vermutung aber nicht schlüssig. Abgesehen von den Sichtbarkeitsbedingungen ist auch die Interaktion mit der Welt in der realen und der virtuellen Umgebung unterschiedlich. In der virtuellen Umgebung wird das Bild der Welt durch Tastendruck bewegt. In der realen Welt dagegen ist es die Versuchsperson selbst, die sich bewegt. Hier findet auch eine aktive Bewegung zwischen den einzelnen Meßstationen statt, während die Versuchspersonen in der virtuellen Umgebung in bezug auf die Lage der einzelnen Standorte auf Wissen aus der realen Welt zurückgreifen müssen. All dies trägt vielleicht dazu bei, daß eine gewissen mentale Anstrengung zum Überwinden des empfundenen Unterschieds zwischen den beiden Umgebungen benötigt wird, die letztendlich für den größeren Fehler der Schätzungen in der virtuellen Welt verantwortlich ist. Auch wie die Schätzungen in den beiden Umgebungen umgesetzt werden (z.B. die Realisierung des Zeigers), ist in beiden Umgebungen verschieden und könnte zu Unterschieden führen. Dennoch sind sich die Schätzungen trotz dieser recht großen Anzahl von Unterschieden in beiden Umgebungen äußerst ähnlich. Auch wenn ein Teil der Information in der virtuellen Umgebung fehlt, ist doch offensichtlich der größte Teil an für die Aufgabe relevanter Information vorhanden.

Nicht nur zwischen Ergebnissen aus realen und virtuellen Umgebungen kann verglichen werden, sondern es können auch Vergleiche zu Versuchen gezogen werden, in denen räumliches Wissen über eine Umgebung auf andere Weise gelernt oder abgefragt wurde. Dabei stellt sich

die Frage, wie sich die Versuchspersonen unter diesen anderen Bedingungen im Vergleich zu virtuellen und realen Umgebungen verhalten.
So kann eine Umgebung - abgesehen von Abgehen in der realen Welt oder Interaktion mit einer virtuellen Umgebung - auch über Karten, Diasequenzen, Videofilme oder reale Fahrten durch die Umgebung kennengelernt werden. Bei Fahrten in der Umgebung sind gegenüber einem freien Gehen in der realen Umgebung der Grad der Interaktivität und die angesprochenen Sinnesmodalitäten verändert. In Experimenten von Goldin und Thorndyke (1982) lernten die Versuchspersonen eine mehrere Kilometer lange Strecke durch eine reale Bustour kennen oder durch einmaliges Anschauen eines Videofilms derselben Strecke. Der mittlere Fehler bei Richtungsschätzungen war in beiden Bedingungen sehr groß, die Video-Gruppe zeigte allerdings noch schwächere Leistungen. In anderen Aufgaben wie dem Wiedererkennen von Orten anhand von Bildern zeigte letztere Gruppe dagegen bessere Leistungen. In mehreren Experimenten werden Richtungen nach tatsächlichem Kontakt mit der Umgebung korrekter eingeschätzt als nach Lernen einer Karte (Thorndyke und Hayes-Roth, 1982; Goldin und Thorndyke, 1982). Schätzungen von Direktdistanzen zwischen zwei Orten sind dagegen meist nach Lernen anhand einer Karte besser. Nach Kartenlernen zeigt sich bei Richtungsschätzungen auch eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Orientierung der gelernten Karte. Die Schätzungen sind dann am besten, wenn die Orientierung der Umgebung mit der Orientierung der Karte übereinstimmt (Presson und Hazelrigg, 1984). Dagegen zeigt sich bei direktem Lernen in der Umgebung keine solche Abhängigkeit. Lernen anhand von Karten führt also nicht unbedingt zu "besserem" oder "schlechterem" Umgebungswissen, sondern vielmehr zu einer anderen Form der Repräsentation mit bestimmten Vorteilen und Nachteilen. Teilweise soll Information über eine Umgebung auch anhand von Dias gelernt werden. Vergleiche dieses Mediums mit anderen Methoden gibt es jedoch kaum. In Versuchen von O'Neill (1991 und 1992) verschlechterte sich sowohl bei Lernen eines Weges anhand von Dias oder in einer virtuellen Umgebung mit zunehmender Komplexität des Bauplans die Leistungen bei einer Wegfindeaufgabe.
Statt der Art des Lernverfahrens kann auch variiert werden, wie das Wissen von der Umwelt abgefragt wird. Sollen Richtungen von Objekten in einer virtuellen Umgebung geschätzt werden, die entweder durch eine Karte oder durch Exploration erlernt wurde, so findet sich die oben beschriebene Orientierungsabhängigkeit ebenfalls nur in der Kartengruppe (Tlauka und Wilson, 1996). Insgesamt scheint Kartenlernen unabhängig von der Testumgebung zu gleichartigen Repräsentationen zu führen. Der Effekt zeigte sich hier allerdings nur bei den Reaktionszeiten, nicht in der Größe des Schätzfehlers. In Versuchen von Thorndyke und Hayes-Roth (1982) wurde die Genauigkeit von Richtungsschätzungen, die mit einem drehbaren Zeiger an den jeweiligen Orten in der realen Welt gemacht wurden, mit solchen verglichen, die später mit demselben Meßgerät in einem Zimmer unter simulierter Orientierung vorgenommen wurden. In dem zweiten Fall sollte sich die Versuchsperson vorstellen, sich an den vorher aufgesuchten Orten mit der gleichen Orientierung wie im realen Versuch zu befinden. Dabei waren die Schätzungen bei simulierter Orientierung im Durchschnitt zwischen 2° und 5° schlechter. Es zeigte sich aber der gleiche Trend in bezug auf den Einfluß von größerer Vertrautheit der Umgebung auf die Korrektheit der Schätzungen, d.h. der Unterschied zwischen der Schätzung am realen Ort und unter simulierter Orientierung bleibt in den verschiedenen Bedingungen etwa konstant. Bei Kindern ist der Unterschied zwischen den zwei Methoden wesentlich größer (Anooshian und Young, 1981). Durch den höheren Abstraktionsgrad könnten die kognitiven Anforderungen der Aufgabe größer werden, d.h. die gespeicherte räumliche Information muß für diese Aufgabenstellung in irgendeiner Form transformiert werden, wodurch ein größerer Fehler entsteht. Die Situation könnte ähnlich zu den hier durchgeführten Versuchen vor der Leinwand sein, wobei in letzterem Fall mehr Informatio-

nen über die Umgebung zur Verfügung steht. Die notwendige mentale Manipulation des räumlichen Wissens läuft bei Erwachsenen offensichtlich ohne größere Probleme oder Auswirkungen auf die grundlegend ablaufenden Prozesse ab, während bei Kindern große Verluste in der Genauigkeit der Schätzungen auftreten. In Versuchen von Mark May (1992) wurden entweder durch Schätzungen von Richtungen, Distanzen oder durch Nachbauen als Modell räumliche Verhältnisse zwischen Landmarken abgefragt. Die erhobenen Daten wurden jeweils in 2D-Karten überführt, im Falle der Distanz- und Richtungsschätzungen durch multidimensionale Skalierung. In allen resultierenden Karten fanden sich Dislokationen einzelner Orte. Diese traten in der Regel zwar bei denselben Orten auf, die Richtung der Dislokation unterschied sich aber zwischen den verschiedenen Methoden. Diese Unterschiede müssen jedoch nicht unbedingt Eigenschaften der mentalen Repräsentation widerspiegeln, sondern können durch die Meßmethoden und die Datenaufbereitung bedingt sein. So haben aus Richtungsschätzungen gewonnene Karten keine feste Skalierung. Bei aus Distanzschätzungen und Richtungsschätzungen gewonnen Karten ergibt sich auch das Problem, wie man diese mit der realen Karte in Deckung bringt, d.h. wo man den beiden Karten gemeinsamen 0-Punkt legt. Die Größe und Richtung von Dislokationen wird durch solche willkürlichen Festlegungen beeinflußt.

Vergleicht man verschiedene Versuche in unterschiedlichen Umgebungen oder unter unterschiedlichen Darbietungsformen miteinander, zeigen sich häufig recht komplexe Zusammenhänge. Häufig ist eine bestimmte Aufgabe in einer Umgebung leicht auszuführen, in einer anderen Umgebung dagegen nicht. Bei einer zweiten Aufgabe zeigt sich dagegen ein umgekehrtes Bild. So kann sich beispielsweise eine stärkere Interaktion mit einer virtuellen Umgebung je nach Aufgabe und Umgebung positiv oder aber auch negativ auf die erbrachten Leistungen auswirken (Péruch und Gaunet, eingereicht). In vielen Fällen ist nicht offensichtlich, weshalb die Reaktion in einer bestimmten Umgebung in dieser Weise ausfällt, in einer weiteren jedoch anders, d.h. welche der veränderten Parameter für ein bestimmtes Verhalten oder Leistung verantwortlich sind. Dies zeigt, daß zum Teil noch das Verständnis für die ablaufenden Prozesse bei verschiedenen Aufgaben fehlt, die diese Unterschiede in den Ergebnissen in den verschiedenen Umgebungen erklären könnten. Letzten Endes läßt sich dieses Problem wohl nur mit der kontrollierten Veränderung vieler Parameter lösen, wozu aber gerade virtuelle Umgebungen gut geeignet sind.

Ob Ergebnisse aus einer virtuellen Umgebung direkt auf die reale Welt übertragbar sind, kann mit dem bisherigen Stand der Forschung nicht eindeutig mit ja oder nein beantwortet werden. Aus dem sich momentan ergebenden Bild erscheint es auch wenig wahrscheinlich, daß es jemals eine so einfache Antwort geben wird. Vielmehr deutet die Gesamtheit der Untersuchungen darauf hin, daß es von den einzelnen Parametern der jeweiligen virtuellen Umgebung abhängen wird, ob oder wie weit sich die Ergebnisse auf die reale Welt übertragen lassen. Es ist auch nicht ganz unproblematisch, ab wann von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse gesprochen werden sollte. Streng ausgelegt besteht diese nur, wenn sich die Leistungen in den verglichenen Umgebungen nicht signifikant unterscheiden. Schwieriger wird es, wenn sich teilweise Übereinstimmungen, teilweise aber auch Unterschiede zwischen den Umgebungen finden, z.B. in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabe. In den hier durchgeführten Versuchen ist der Fehler in der virtuellen Umgebung signifikant größer als in der realen Welt, die Verteilung der systematischen Fehler ist in beiden Umgebungen aber bemerkenswert ähnlich, so daß es gerechtfertigt erscheint, von einer direkten Übertragbarkeit zu sprechen. Es zeigt sich also ein weiteres Problem: Je nachdem, wie die Daten analysiert werden, finden sich signifikante Unterschiede oder auch nicht. Bei einem größeren Unterschied im mittleren Fehler in

den beiden Umgebungen aber gleicher Verteilung der systematischen Fehler wäre die Entscheidung, ob man von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse sprechen will, problematischer. Bis sich allgemein akzeptierte Maßstäbe entwickeln, wird es vorerst wohl jedem selbst überlassen werden müssen, wo diese Grenze gesetzt wird. Mit der weiteren Nutzung dieser Technologie lassen sich vielleicht auch allgemeine Merkmale von virtuellen Umgebungen finden, die eine Voraussetzung für eine solche Übertragbarkeit sind. Genaue Angaben über die Details der virtuellen Umgebung könnten für das Verständnis der entscheidenden Parameter wichtig werden. Auf jeden Fall können in virtuellen Umgebungen durch die vielen Möglichkeiten zur Manipulation und durch die Kontrollierbarkeit neue und wichtige Fragestellungen untersucht werden. Auch wenn eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse von einer virtuellen Umgebung auf die reale Welt also noch mit Vorsicht betrachtet werden sollte, werden virtuelle Umgebungen dennoch fraglos zum Verständnis von kognitiven Leistungen in der realen Welt beitragen.

6. Allgemeine Diskussion und Ausblick

Ein Gedächtnis für räumliche Beziehungen hilft dem Menschen beim täglichen Umgang mit der Umwelt. In den hier durchgeführten Experimenten sollten Eigenschaften dieses Gedächtnisses anhand von Richtungsschätzungen untersucht werden. Um sicherzustellen, daß die Versuchspersonen tatsächlich auf Gedächtnisinhalte zurückgreifen, sollten Richtungen zu Orten geschätzt werden, die vom jeweiligen Standort nicht sichtbar waren. Der momentane Wahrnehmungshorizont lieferte den Versuchspersonen nicht die Antwort, sondern sie mußten auf ihre Repräsentation von der Umgebung zurückgreifen. Allerdings können sie dabei gewisse Hinweise aus der Umgebung zu Hilfe nehmen (z.B. globale Richtungsinformationen, Straßen). Andererseits müssen die Antworten in bezug auf die Umgebung korrekt sein. Der Einfluß, den die Umgebung auf diese Richtungsschätzungen hat, sollte ebenfalls analysiert werden. Tests wurden in einer realen und einer virtuellen Version derselben Umgebung durchgeführt. Dieser Teil des Versuches steht im Rahmen einer größeren Fragestellung, bei der es um die Bewertung von Ergebnissen aus virtuellen Umgebungen geht, genauer gesagt um die Frage, ob Ergebnisse aus virtuellen Umgebungen direkt auf die reale Welt übertragbar sind.

6.1 Mentale Repräsentation der Umgebung

Eine mentale Repräsentation von der Umgebung ist für viele Tierarten und auch den Menschen eine Grundlage für das tägliche Leben. Die Repräsentation vermittelt den Umgang mit der Umwelt und Planung von Verhalten in der Umgebung. Über den Aufbau und die Inhalte der Repräsentation wurden verschiedene Theorien entwickelt. Es gibt auch grundsätzlich verschiedene Ansätze und Vorannahmen, unter denen räumliche Repräsentationen untersucht wurden. Behavioristen setzen räumliches Lernen mit Konditionierung gleich. Es wird jedoch mehr Information über die Umgebung verarbeitet, als zur Erfüllung der momentanen Aufgabe notwendig ist (Tolman, 1948). Solches zusätzliches Wissen hilft zwar nicht bei der momentanen Aufgabe, könnte aber bei zukünftigen Aufgaben Vorteile bringen. Es wäre sinnvoll, in der Umwelt immer die Art von Wissen zu erwerben, die dort generell von Nutzen ist; z.B. werden unbekannte Umgebungen von Ratten auch bei Hunger und vorhandener Nahrung zuerst exploriert, bevor sie sich der Nahrungsaufnahme zuwenden (Thinus-Blanc, 1996). In einer natürlichen Umgebung könnte dies durchaus ein sinnvolles Verhalten sein: Man kann erwarten, daß eine eventuell notwendige Flucht vor Feinden, die aufgrund der Kenntnis der Umgebung erfolgreich ist, für das Tier wichtiger ist als eine sofortige Nahrungsaufnahme. Eine andere Forschungsströmung (vor allem von Psychologen betrieben) beschäftigt sich vor

allem mit den Inhalten und Eigenschaften der Repräsentation der Umgebung und beachtet dabei die Funktion der Repräsentation für den Alltag relativ wenig. Die Vorstellungen orientieren sich meist an topographischen Karten. Somit geht es vor allem um die Frage, ob die Repräsentation die Form einer metrischen Karte hat. Die Richtungsschätzungen in dem hier durchgeführten Versuch zeigen sowohl in der realen als auch der virtuellen Umgebung eine hohe metrische Korrektheit. Auch andere Untersuchungen finden - mit wenigen Ausnahmen - metrisches Wissen von der Umgebung. Dieses wird durch die hier durchgeführten Versuche bestätigt. Auch aufgrund von räumlichen Beschränkungen, die sich durch eine topologische Karte ergeben, können in gewissem Umfang Richtungen abgeschätzt werden. Dabei ist jedoch nicht die hier beobachtete hohe metrische Genauigkeit zu erwarten. Dies spricht dafür, daß die Schätzungen tatsächlich auf metrischem Wissen von der Umwelt basieren. Eine metrische Repräsentation erlaubt einen sehr flexiblen Umgang mit der Umwelt. Mit ihr können Abkürzungen oder günstige Ausweichrouten bei Blockierung eines Weges gefunden werden. Bei Unsicherheiten in bezug auf eine Route - ob man z.B. an einer bestimmten Kreuzung rechts abbiegen muß - kann das Heranziehen von Wissen um Richtungen zu einer sinnvollen Entscheidung führen. Bei standorttreuer Lebensweise in einer Umgebung, in der eine Reihe von Orten durch Routen verbunden sind, ist eine metrische Karte auch eine im Kosten-Nutzen-Verhältnis günstige Repräsentationsform.

Es finden sich aber auch systematische Fehler bei den Schätzungen der Versuchspersonen in der Tübinger Innenstadt und in der virtuellen Umgebung. Auch in anderen Experimenten wurden systematische Fehler gefunden (May, 1992; Giraudo und Pailhous, 1994). Die hier beobachteten Fehler stimmen mit solchen überein, die aufgrund einer Repräsentation in Form einer metrischen Karte mit lokalen Verzerrungen (Dislokationen und Misorientierungen) entstehen würden. Es kommen aber auch andere Erklärungsmöglichkeiten in Frage. Obwohl metrisches Wissen zweifellos vorhanden ist, sollte nicht strikt von einer mentalen Repräsentation in Form einer Karte ausgehen; das metrische Wissen könnte auch in anderer Form in die mentale Repräsentation eingebunden sein. Möglicherweise könnte auch die Richtung, in der die zum Ziel führende Straße verschwindet, zu den beobachteten systematischen Fehlern führen (Okabe et al., 1986). Die von den Versuchspersonen angegebene Strategie, in Gedanken den Weg zum genannten Ort zu verfolgen, läßt einen Einfluß dieses Parameters als wahrscheinlich erscheinen. Auch aus anderen Untersuchungen gibt es Hinweise darauf, daß die Repräsentation nicht kartenförmig ist (Foley und Cohen, 1984; Herrmann und Schweizer, 1998), aber genug metrische Information enthält, um daraus eine relativ genaue metrische Karte zu rekonstruieren. Dieses metrische Wissen macht die Repräsentation - genau wie eine metrische Karte - vielseitig einsetzbar.

Es zeigte sich außerdem eine generelle Tendenz, daß von häufiger aufgesuchten Orten der Fehler in den Richtungsschätzungen geringer ist. In anderen Versuchen zeigt sich ein ähnlicher Effekt: Eine größere Vertrautheit mit dem Ort durch längeren Kontakt mit der Umgebung oder längeres Training in der (virtuellen) Umgebung führt ebenfalls zu Verbesserungen (Thorndyke und Hayes-Roth, 1982; Ruddle et al., 1997; Cousins et al., 1983). Dies spricht aber nicht unbedingt für das Modell von Siegel und White (1975), bei dem eine Überblickswissen erst nach Routen- und Landmarkenwissen gebildet wird. Vielmehr scheinen sich Routenwissen und Übersichtswissen mit der Zeit in gleichem Maße zu verbessern (Ruddle, 1997). Der allein durch Rauschen bedingte Fehler in den Schätzungen könnte durch wiederholte Erfahrung von Winkeln und Strecken reduziert werden. In vielen Umgebungen werden bei längerem Kontakt auch mehr Routen zu einem Ziel erlernt. Dies könnte zu einer stärkeren Eingrenzung des Gebietes führen, in der fragliche Ort vernünftigerweise angenommen werden kann.

In den hier durchgeführten Versuchen fanden sich auch geschlechtsspezifische Unterschiede, mit geringeren durchschnittlichen Fehlern bei den Männern. Dies paßt in das Bild, daß Männer bei vielen räumlichen Aufgaben bessere Leistungen zeigen. Andererseits findet sich bei ähnlichen Aufgabenstellungen wie in den hier durchgeführten Versuchen nicht immer eine Überlegenheit der Männer, so daß - auch aufgrund der geringen Versuchspersonenzahlen - keine weitgehenden Schlüsse gezogen werden sollten.

6.2 Vergleich zwischen realer und virtueller Umgebung

Mit der Technologie der Virtuellen Realität lassen sich auch komplexe Umgebungen kontrolliert manipulieren. Durch solche Manipulationen sind gegenüber einfachen Stimuli, wie sie in einem Großteil der Wahrnehmungsforschung verwendet werden, neue Klassen von Versuchen realisierbar, aus denen sich viel über Handlungen und Wahrnehmungen in komplexen Umgebungen lernen läßt. Vor allem eröffnet sich durch die Interaktivität der virtuellen Umgebungen auch die Möglichkeit, auch Handlungen kontrolliert zu untersuchen, was bisher kaum möglich war. Durch die komplexeren Umwelten können Top-down-Effekte und Kontexteinflüsse (Christou und Bülthoff, im Druck) in den Antworten der Versuchspersonen wirksam werden; gleichermaßen können von den Versuchspersonen verschiedene Strategien verfolgt werden. Eine bisher ungeklärte Frage ist, inwiefern sich Ergebnisse aus virtuellen Umgebungen direkt auf die reale Welt übertragen lassen. In klassischen Laborversuchen lautet die Fragestellung, wie Versuchspersonen unter bestimmten Bedingungen reagieren und was dies über die menschliche Wahrnehmung und die Funktionsweise des Gehirns aussagt. Mit den Methoden der virtuellen Realität kann diese Fragestellung auf neue Bereiche ausgedehnt werden; können darüber hinaus aber auch noch Aussagen über die Wahrnehmungen und Handlungen des Menschen in der realen Welt getroffen werden? Die hier durchgeführten Versuche sollen ein Ansatz sein, diese Frage zu beantworten.
Die Ergebnisse in den hier durchgeführten Experimenten waren in realer und virtueller Umgebung sehr ähnlich, wenn in letzterer auch etwas größere Fehler auftraten. Nach der Ähnlichkeit in der Verteilung der systematischen Fehler, den von den Versuchspersonen angegebenen Strategien und dem Verhalten der Versuchspersonen haben sie offensichtlich beiden Umgebungen auf dieselbe Repräsentation zurückgegriffen und dieselben Strategien verfolgt. In den hier durchgeführten Versuchen zeigte sich ein fast verlustloser Transfer von räumlichem Wissen aus der realen Welt in eine virtuelle Umgebung. Offen bleibt jedoch die Frage, ob auch ein Erwerb von Übersichtswissen in einer virtuellen Umgebung und eine darauffolgender Transfer auf die reale Welt ebenso erfolgreich ist. Dazu wäre ein Umkehrversuch in einem virtuellen Modell der Tübinger Innenstadt erforderlich. Dabei würde die Versuchspersonen dessen räumliche Struktur durch interaktive Bewegung in diesem Modell kennenlernen und anschließend Richtungen in dieser Umgebung und im realen Tübingen schätzen. Bisherige Versuche zu einem solchen Transfer von virtuellen Umgebungen auf die reale Welt zeigen unterschiedlich gute Ergebnisse (Waller et al., 1998; Witmer et al., 1996; Wilson et al., 1997). Ein Transfer von Wissen findet in allen genannten Fällen statt, allerdings ist die Qualität der Übertragung unterschiedlich. Allgemein zeigen sich bei Vergleichen zwischen realen und virtuellen Umgebungen zum Teil Ähnlichkeiten, zum Teil aber auch Unterschiede zwischen diesen Umgebungen. Es scheint von der jeweiligen virtuellen Umgebung selbst abzuhängen, ob ein Transfer von Wissen in die reale Welt gegeben ist. Je realistischer die virtuelle Welt ist (d.h. je mehr Details sie enthält und je mehr Sinne sie anspricht), desto eher läßt sich ein Transfer des Wissens in die reale Welt erwarten. So können Versuchspersonen, die sich mit einer virtuellen Umgebung durch aktive Bewegung vertraut gemacht haben, Ansichten

dieser Umgebung aus unbekannten Blickwinkeln sicherer erkennen als Versuchspersonen, denen die Bewegungen der aktiven Gruppe vorgespielt wurden, d.h. die dieselbe Umgebung sozusagen als Beifahrer kennengelernt hatten (Christou und Bülthoff, angenommen). Es könnten aber auch Abweichungen von der Annahme auftreten, daß ein höherer Realismus in virtuellen bessere Leistungen hervorruft. Dies kann Aufschluß darüber geben, welche Arten von Informationen bei der Navigation eine besonders wichtige Rolle spielen und hat auch Bedeutung für das Verständnis der Navigationsmechanismen selbst. Über eine derartige Kenntnis wichtiger Informationsquellen lassen sich auch Aussagen in bezug auf die Navigationsmechanismen machen. Praktische Bedeutung hat dies für die Entwicklung neuer, effektiverer virtueller Welten zu Forschungs- oder Trainingszwecken. So können mit Ergebnissen aus der Grundlagenforschung Fahr- oder Flugsimulatoren der menschlichen Wahrnehmung angepaßter und somit voraussichtlich effektiver gestaltet werden. In jedem Fall bieten virtuelle Umgebungen interessante Möglichkeiten zur kontrollierten Untersuchung von Handlungen und Wahrnehmungen des Menschen in komplexen Umgebungen, auch wenn noch genauer untersucht werden muß, ob oder vielmehr unter welchen Bedingungen Ergebnisse von virtuellen auf reale Umgebungen übertragen werden können.

Anhang A

Versuchsanleitung

a) *in der realen Umgebung*

Das Ziel des Versuches ist es, etwas über die Genauigkeit des Richtungssinns des Menschen von seiner Umwelt zu erfahren.
Wir werden einen Rundgang durch die Innenstadt Machen (Dauer: etwa 2 Std). Der Versuchsleiter wird Ihnen einen bestimmten Ort nennen bzw. ein Foto davon zeigen, dessen Richtung Sie zeigen sollen. Sie tun dies, indem Sie den Zeiger des Meßgeräts so lange drehen, bis Sie meinen, daß er in Richtung des angegebenen Ortes zeigt. Wenn Sie den Zeiger eingestellt haben, treten Sie bitte einen Schritt zurück. Die Versuchsleiterin wird dann den "Richtungswert" notieren und Ihnen dann den nächsten Ort nennen. Die Anzahl der Orte, die der Versuchsleiter Ihnen nennt, wird für die unterschiedlichen Meßorte unterschiedlich sein (9-10). Die Reihenfolge der zu zeigenden Orte ist willkürlich festgelegt worden.
Im Anschluß an den Versuch ist noch ein Fragebogen auszufüllen, mit dem wir erfahren wollen, wie häufig und in welchem Zusammenhang sie die Innenstadt besuchen.

b) *in der virtuellen Umgebung*

Sie werden einen Ort innerhalb Tübingens sehen. In der Mitte der Leinwand befindet sich ein "virtueller" Zeiger. Sie werden den Namen eines Ortes sehen, in dessen Richtung Sie zeigen sollen. Sie tun dies, indem Sie das Bild der Umwelt soweit drehen, bis der Zeiger Ihrer Meinung nach in die Richtung des genannten Ortes zeigt. Wenn Sie mit der Einstellung zufrieden sind, drücken Sie die Leertaste. Wenn Sie von einem Ort in alle Richtungen gezeigt haben, wird derselbe Vorgang von anderen Plätzen innerhalb Tübingens wiederholt.

Sie bewegen sich mit folgenden Tasten:

Es werden die Tasten des NumberPad benutzt.

4: 10-Grad-Sprung nach links	6: 10-Grad-Sprung nach rechts
7: kleine Bewegung nach links	9: kleine Bewegung nach rechts

Anhang B

Lokationen

B.1 Startpunkte in der realen und der virtuellen Umgebung

Versuchsperson	*Startpunkt*	*Richtung*
abu	Haagtor	1
ado	Schloß	2
aja	Arsenal	1
and	Krumme Brücke	2
chb	Johanneskirche	1
kas	Stiftskirche	1
mat	Lustnauer Tor	2
ssh	Marktplatz	2
uls	Jakobuskirche	1
vlb	Post	2

Tabelle 5: Die Tabelle gibt die Kürzel der einzelnen Versuchspersonen in der ersten Spalte an. In der zweiten Spalte sind die jeweiligen Orte, an den die Versuchspersonen mit den Richtungsschätzungen begonnen haben, zu sehen. Die letzte Spalte und die Richtung enthält die Richtung, in der die Route abgelaufen wurde. In der virtuellen Umgebung fand keine Bewegung zwischen den Orten statt; die Routenrichtung gibt hier nur an, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Standorte auf der Leinwand gezeigt wurden. Richtung 1: Route entgegen dem Uhrzeigersinn abgelaufen (in bezug auf die genordete Karte); 2: im Uhrzeigersinn.

B.2 Karten der Meßorte

Die folgenden Kartenausschnitte sollen der genaueren Bestimmung der Standorte, von denen aus die Versuchspersonen Schätzungen vornahmen, dienen. Die jeweiligen Standorte sind mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet. Hinter den Ortsbezeichnungen sind in Klammern die Koordinaten des Standortes angegeben, wie sie auf den Katasterplänen der Innenstadt (Stand 1976, Maßstab 1:500) zu finden sind (WO-Koordinate/NS-Koordinate in Metern; der Ursprung des Koordinatensystems liegt an der Nordostecke des Schlosses).

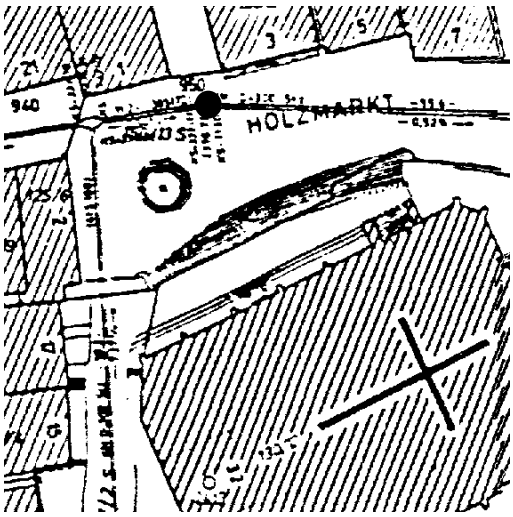

Abb. 27: Holzmarkt (364.5/70)

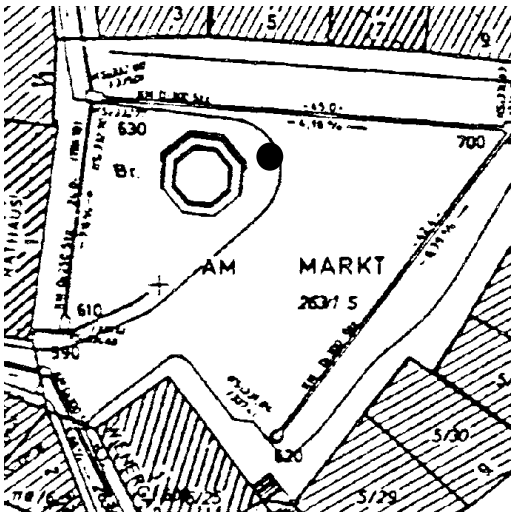

Abb. 28: Markt (210.5/64)

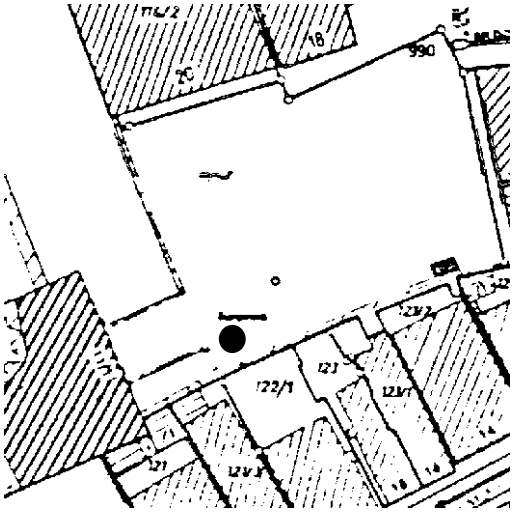

Abb. 29: Schloß (102/-20.5)

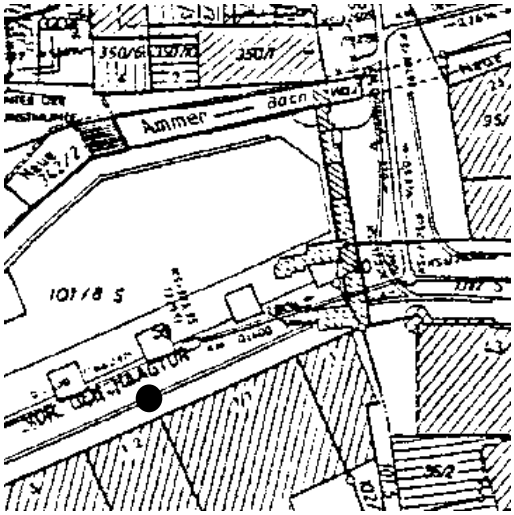

Abb. 30: Haagtor (-94.5/66.5)

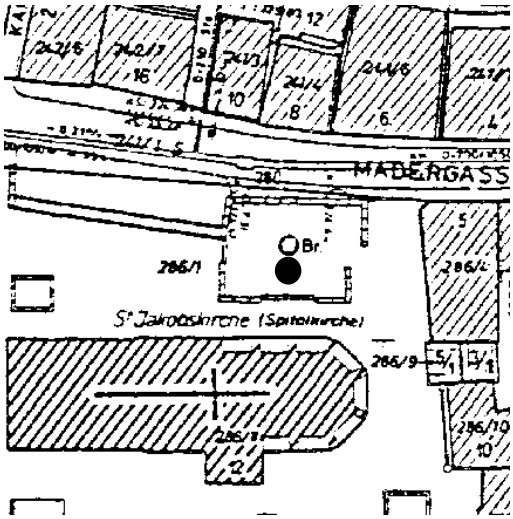

Abb. 31: Jakobuskirche (39.5/208.5)

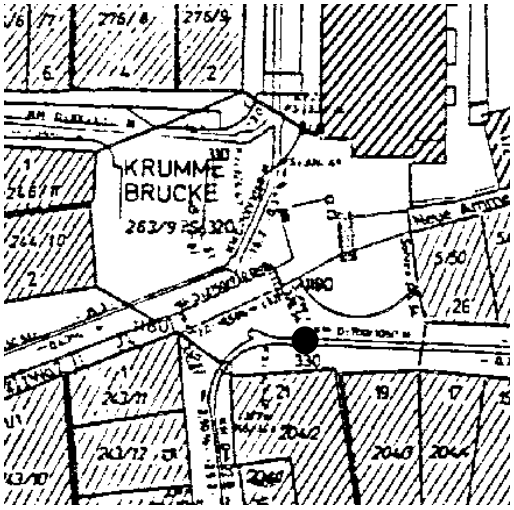

Abb. 32: Krumme Brücke (97/141.5)

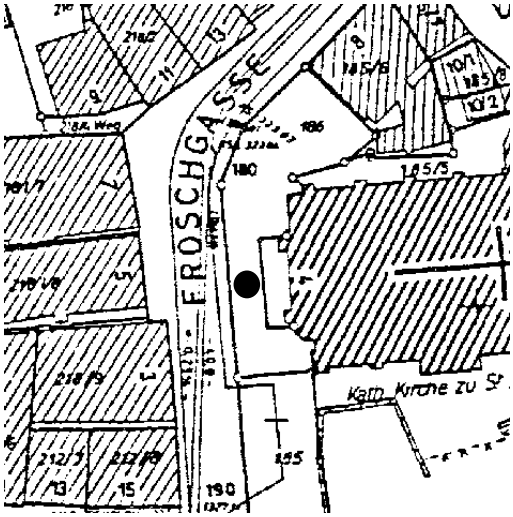

Abb. 33: Johanneskirche (247.5/215)

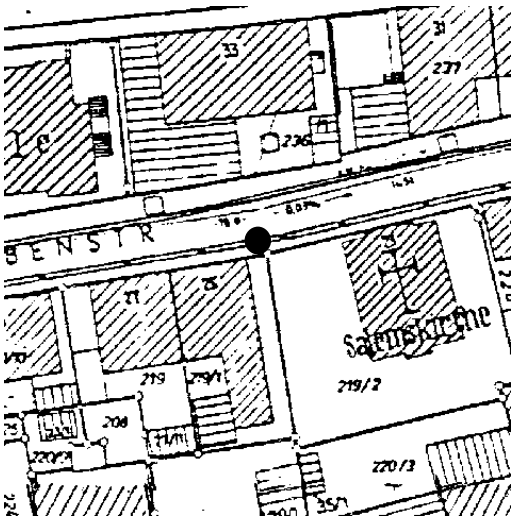

Abb. 34: Arsenal (235.5/328)

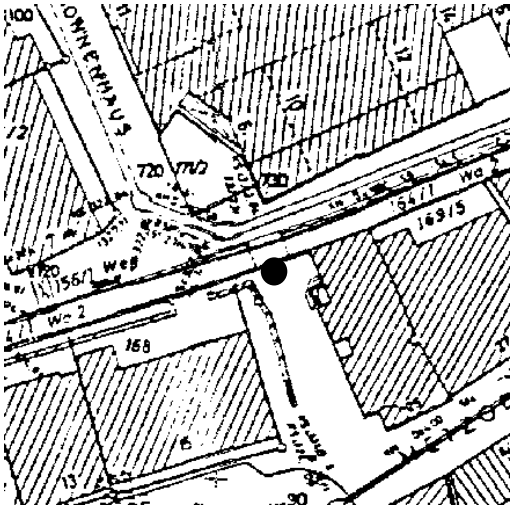

Abb. 35: Nonnenhaus (406.5/223)

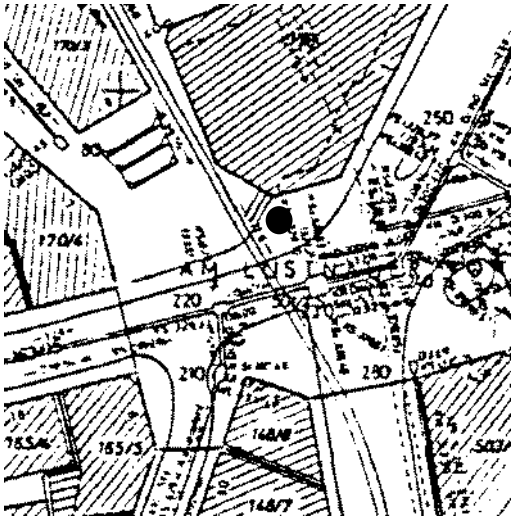

Abb. 36: Lustnauer Tor (490.5/199.5)

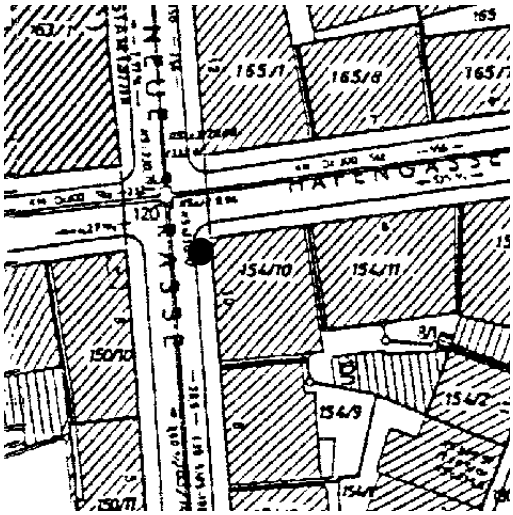

Abb. 37: Post (421/138.5)

B.3 Panoramabilder

Abb. 38 bis Abb. 48 zeigen in reduzierter Auflösung und für den Druck aufgehellter Version die digitalisierten Panoramabilder, die für die virtuelle Umgebung verwendet wurden.

Abb. 38: Holzmarkt

Abb. 39: Markt

Abb. 40: Schloß

Abb. 41: Haagtor

Abb. 42: Jakobuskirche

Abb. 43: Krumme Brücke

Abb. 44: Johanneskirche

Abb. 45: Arsenal

Abb. 46: Nonnenhaus

Abb. 47: Lustnauer Tor

Abb. 48: Post

Anhang C

Fragebogen

Wohnort (Stadtviertel):
Alter:
Geschlecht:
Beruf/Studium:

1) Wie lange wohnen Sie schon in Tübingen (an oben genanntem Wohnort)? ___ Jahre

Haben Sie vorher woanders in Tübingen gewohnt? Ja Nein
Wenn ja - vorherige Wohnorte (Stadtviertel) und Wohndauer (Jahre):

2) Mit welchen Verkehrsmitteln sind Sie normalerweise in Tübingen unterwegs?
(Zutreffendes ankreuzen, Mehrfachnennungen möglich)

Auto Motorrad/Mofa Fahrrad öffentliche Verkehrsmittel zu Fuß
Sonstiges:

3) Wie häufig sind Sie in der Innenstadt? (Zutreffendes ankreuzen)

Täglich
mehrmals pro Woche
etwa einmal pro Woche
einmal bis mehrmals im Monat
seltener

4) Was tun Sie, wenn Sie in der Innenstadt sind (z.B. einkaufen, ins Kino, in die Kneipe gehen)?

5) Wie gut kennen Sie die folgenden Orte? (Zutreffendes Ankreuzen)

	sehr gut		einigermaßen		sehr schlecht
Marktplatz:	1	2	3	4	5
Holzmarkt (Stiftskirche):	1	2	3	4	5
Haagtor:	1	2	3	4	5
Jakobuskirche:	1	2	3	4	5
Johanneskirche (Froschgasse):	1	2	3	4	5
Krumme Brücke:	1	2	3	4	5
Nonnenhaus:	1	2	3	4	5
Lustnauer Tor:	1	2	3	4	5
Schloß (Vorplatz):	1	2	3	4	5
Kino Arsenal:	1	2	3	4	5
Postamt:	1	2	3	4	5

6) Benutzen Sie den Stadtplan von Tübingen? (Zutreffendes Ankreuzen)

sehr oft oft manchmal selten nie
1_____2_____3_____4_____5

7) Haben Sie Tübingen schon von oben gesehen (z.B. Turm der Stiftskirche, Blick vom Schloß, Luftaufnahmen usw.)?

8) Wie schätzen Sie Ihren Orientierungssinn ein? (Zutreffendes ankreuzen)
sehr gut sehr schlecht
1____2____3____4____5____6____7

9) Welche Strategie oder Strategien haben Sie während des Versuches benutzt?

10) Nennen Sie 5 markante Plätze/Gebäude/Orte, die sie als Orientierung in der Tübinger Innenstadt verwenden!

11) Kommentare:

nur für die virtuelle Umgebung:

Was haben Sie als unterschiedlich zwischen diesem und dem vorigen Experiment empfunden?

Haben Sie Erfahrung mit "künstlichen Welten" (z.B. durch Computerspiele)?

Anhang D

Detaillierte Auflistung der Ergebnisse

D.1 Richtungsschätzungen der einzelnen Versuchspersonen in der realen und der virtuellen Umgebung

Die folgenden Abbildungen geben die von den einzelnen Versuchspersonen geschätzten Richtungen auf einer Karte mit den einzelnen Orten in farbkodierter Form wieder (s. auch Abb. 6 für Beschreibung der Graphen). Die Abbildungen für die in der realen Umgebung gezeigten Richtungen sind dabei jeweils in der ersten Spalte aufgetragen, für die virtuelle Umgebung in der zweiten Spalte.

reale Umgebung

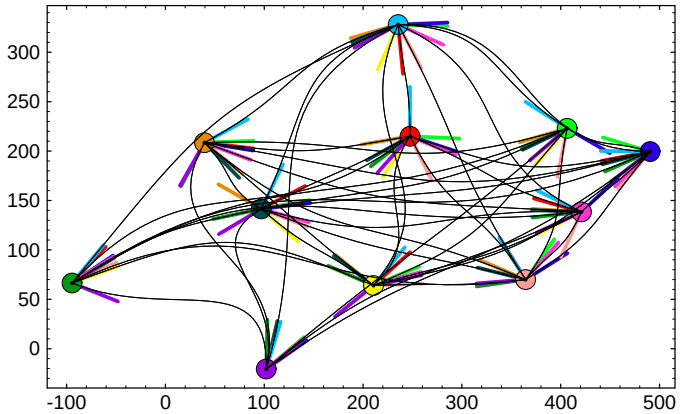

Abb. 49: abu

virtuelle Umgebung

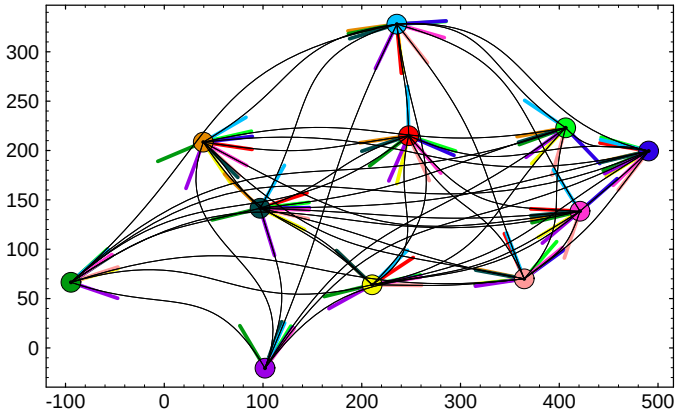

Abb. 50: abu

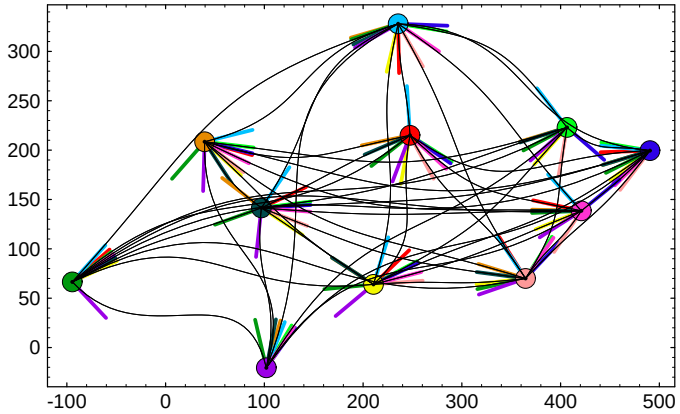

Abb. 51: abuz

Reale Umgebung ***Virtuelle Umgebung***

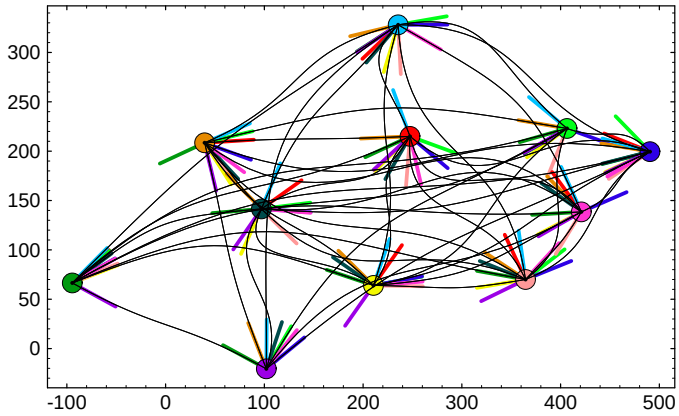

Abb. 52: ado

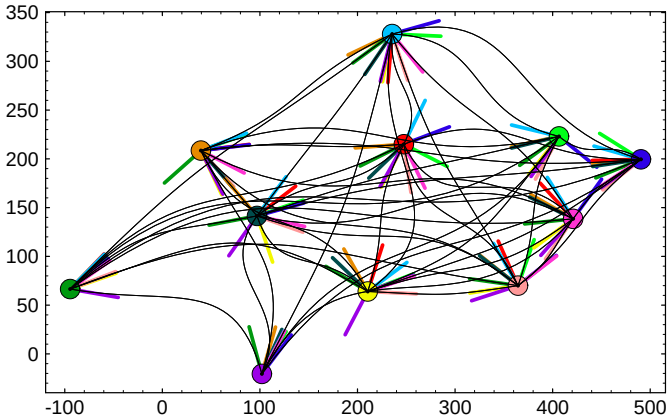

Abb. 53 ado

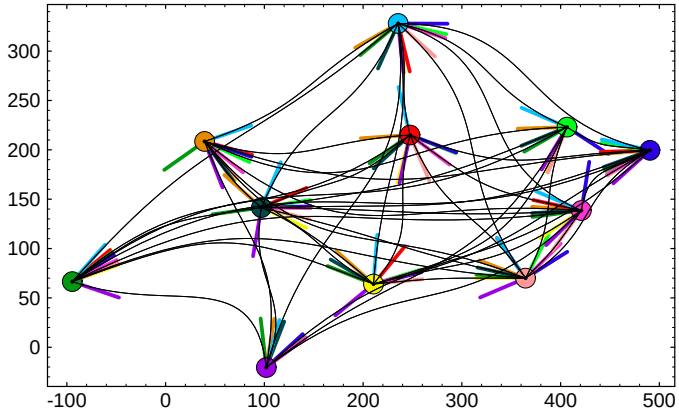

Abb. 54: aja

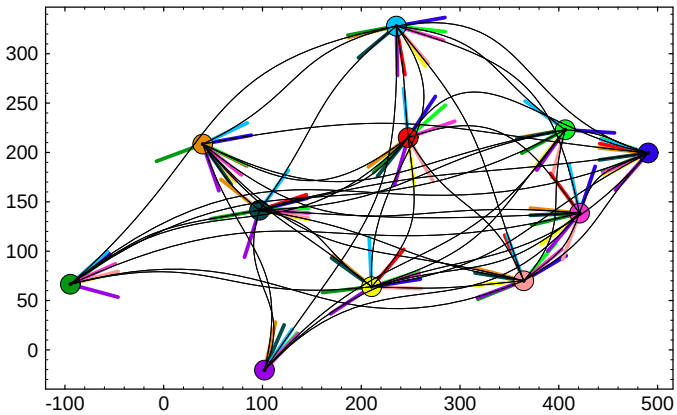

Abb. 55: aja

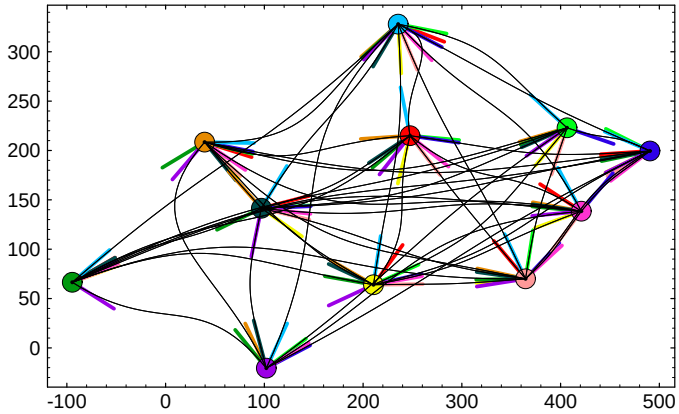

Abb. 56: and

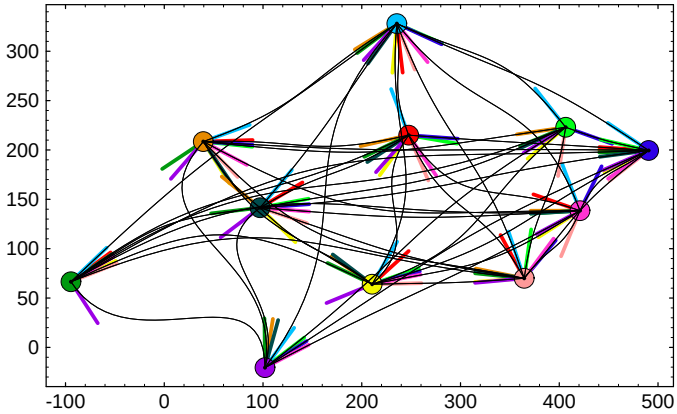

Abb. 57: and

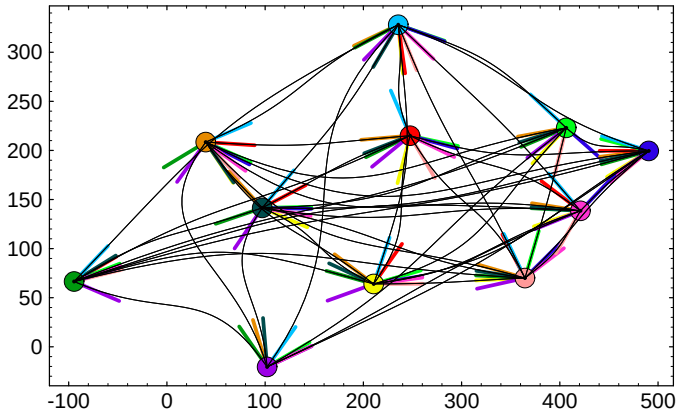

Abb. 58: andz

Reale Umgebung

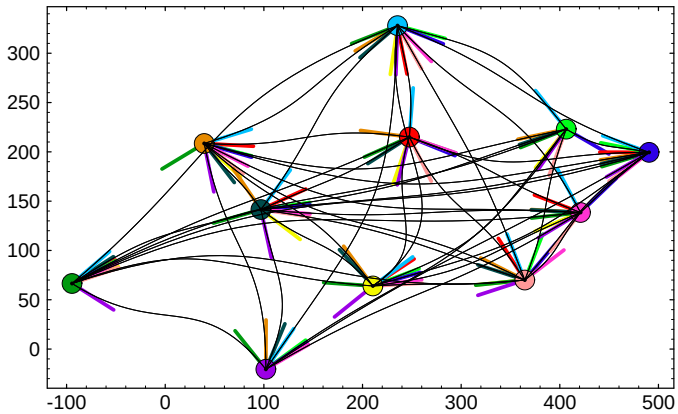

Abb. 59: chb

Virtuelle Umgebung

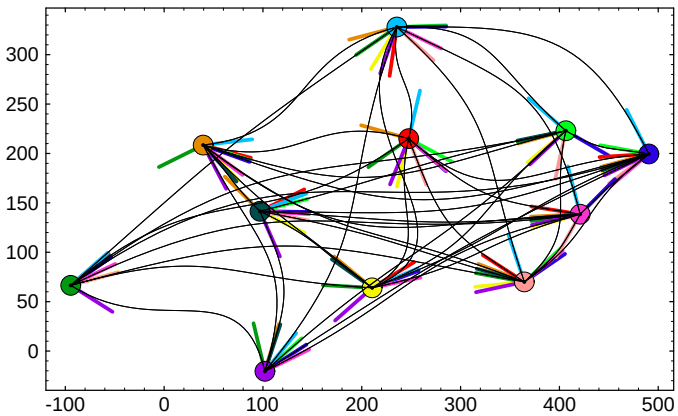

Abb. 60: chb

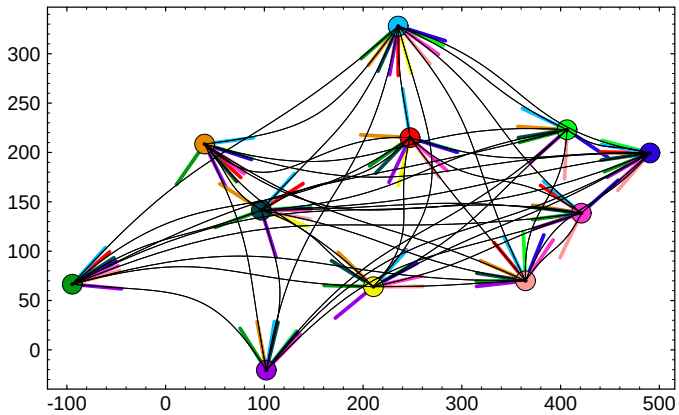

Abb. 61: kas

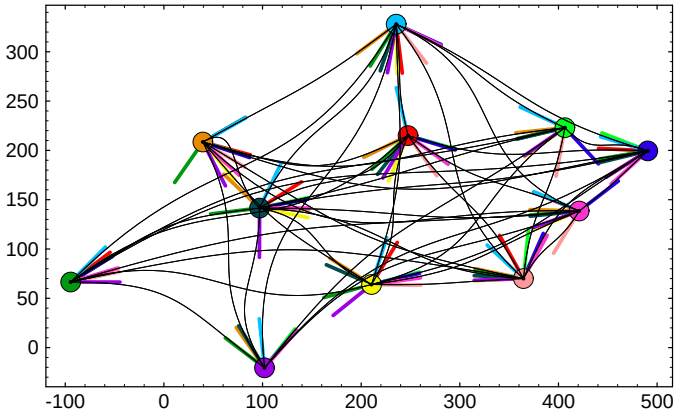

Abb. 62: kas

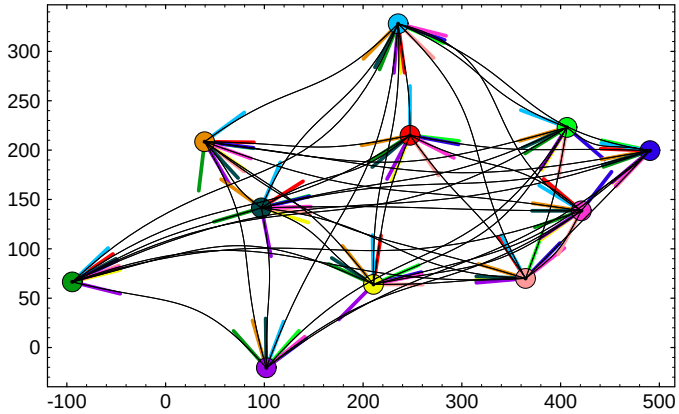

Abb. 63: kasz

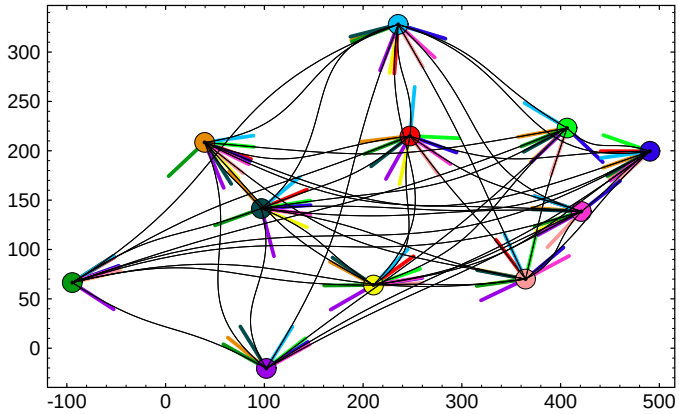

Abb. 64: mat

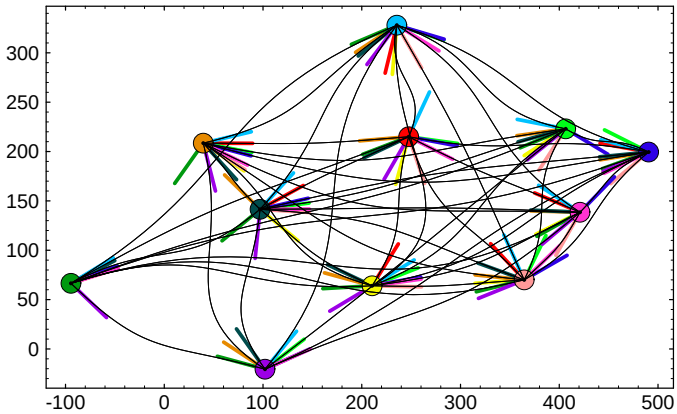

Abb. 65: mat

Reale Umgebung ***Virtuelle Umgebung***

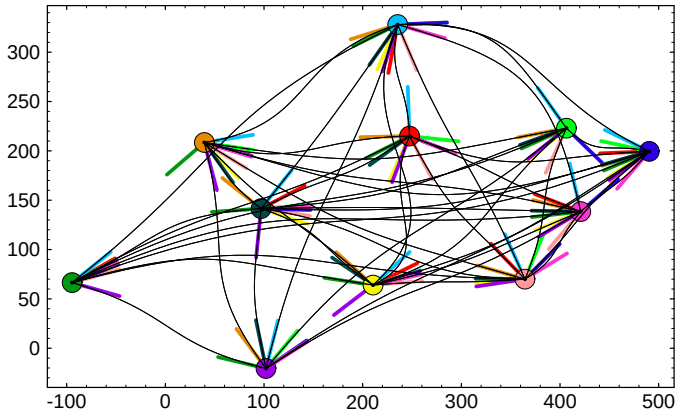

Abb. 66: ssh

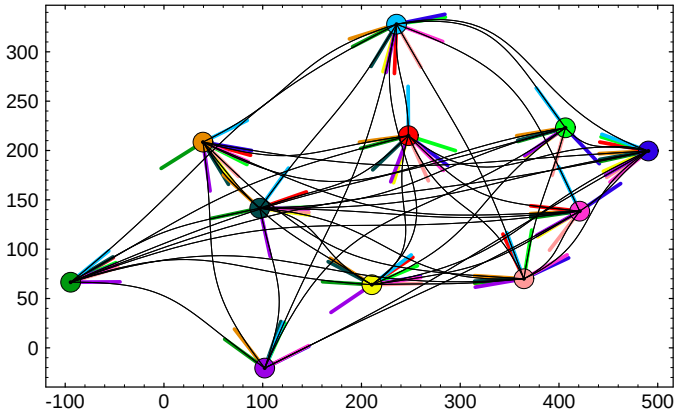

Abb. 67: ssh

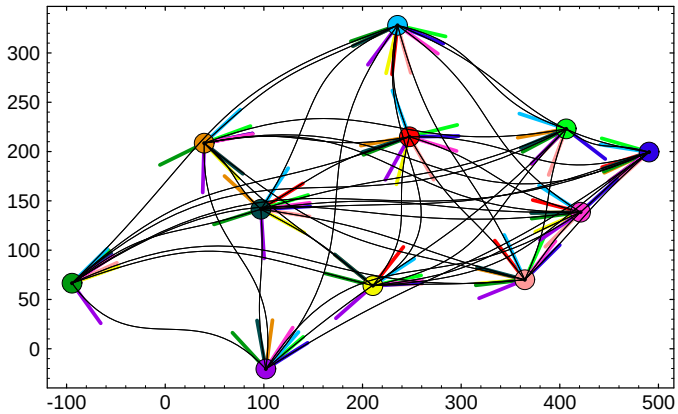

Abb. 68: uls

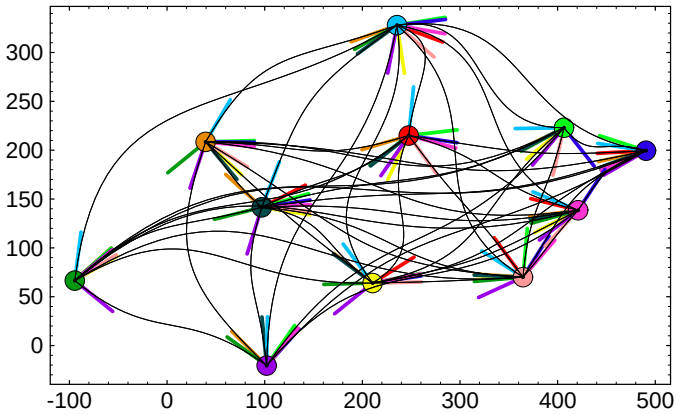

Abb. 69: uls

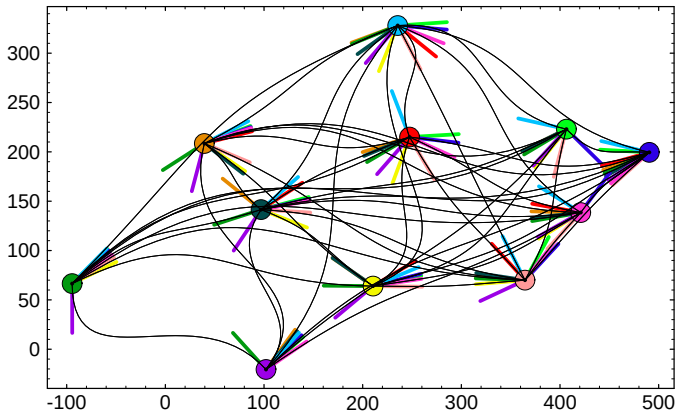

Abb. 70: ulsz

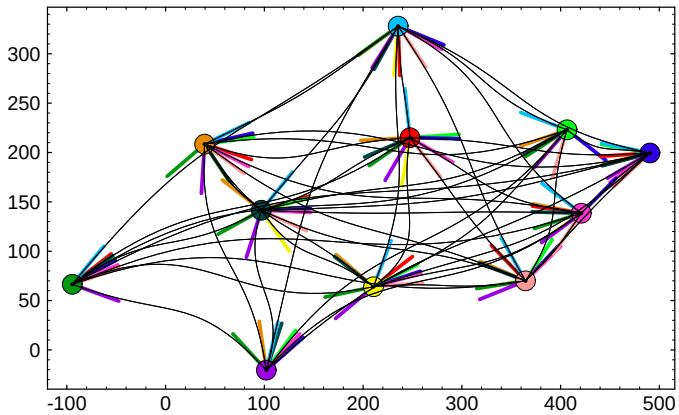

Abb. 71: vlb

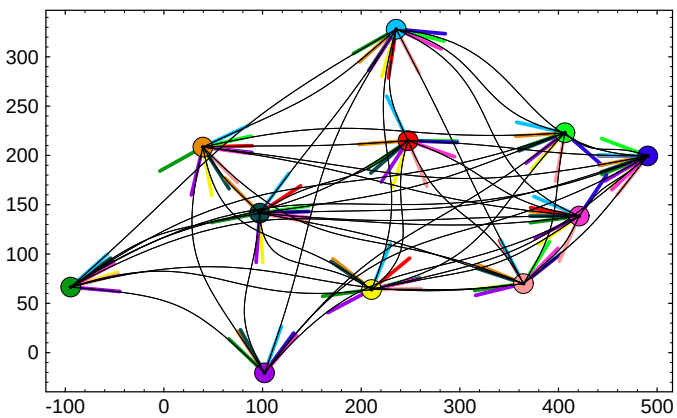

Abb. 72: vlb

D.2 "Von"- und "Zu"-Fehler der einzelnen Versuchspersonen in der realen und der virtuellen Umgebung

Die folgenden Abbildungen zeigen die "Von"- und "Zu"-Fehler der einzelnen Versuchspersonen an den verschiedenen Orten. Die Abbildungen in der ersten Spalte zeigen dabei den Fehler in der realen Umgebung, die Abbildungen in der zweiten Spalte die Fehler in der virtuellen Umgebung (für die Definition von "Von"- und "Zu"-Fehler siehe Abschnitt 5.2.2.).

reale Umgebung ***virtuelle Umgebung***

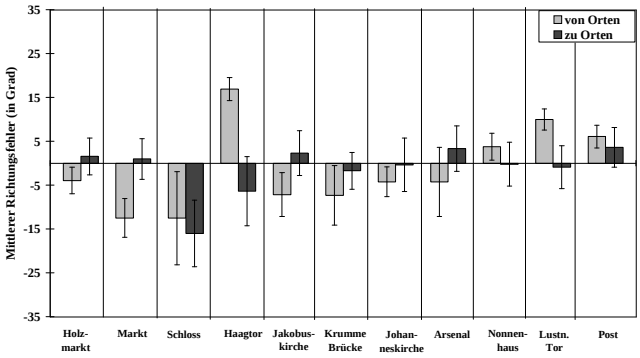

Abb. 73: abu

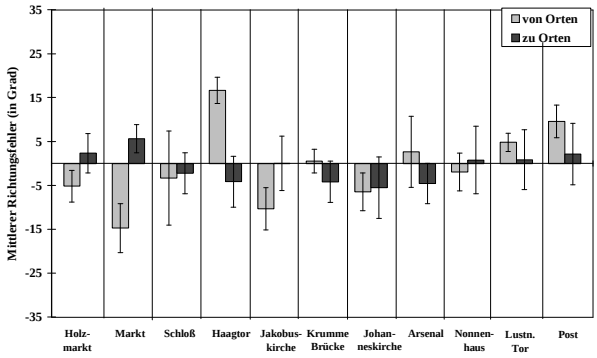

Abb. 74: abu

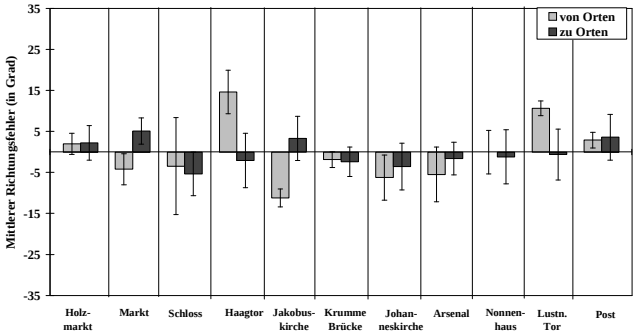

Abb. 75: abuz

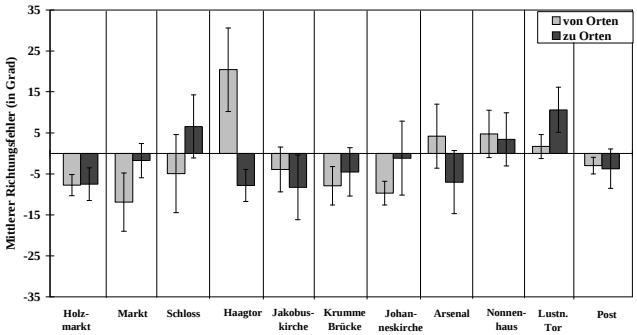

Abb. 76: ado

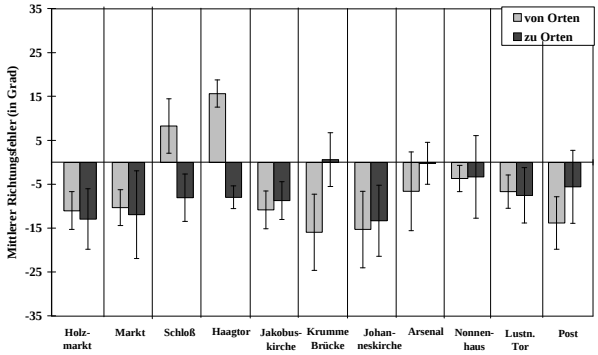

Abb. 77: ado

Reale Umgebung ***Virtuelle Umgebung***

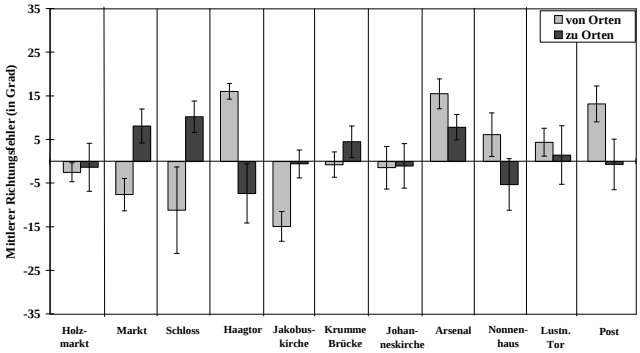

Abb. 78: aja

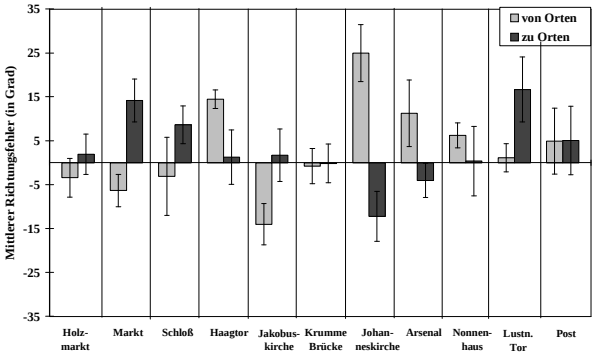

Abb. 79: aja

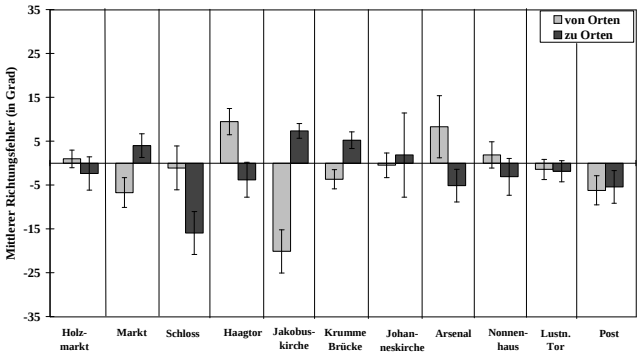

Abb. 80: and

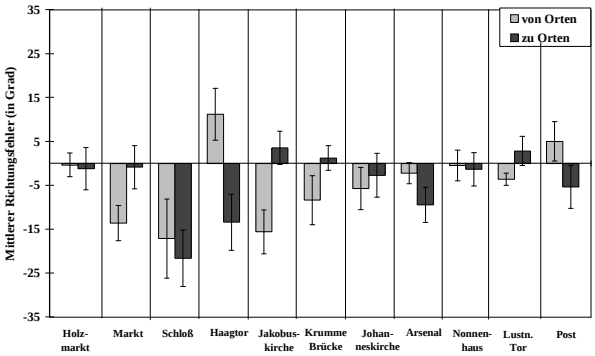

Abb. 81: and

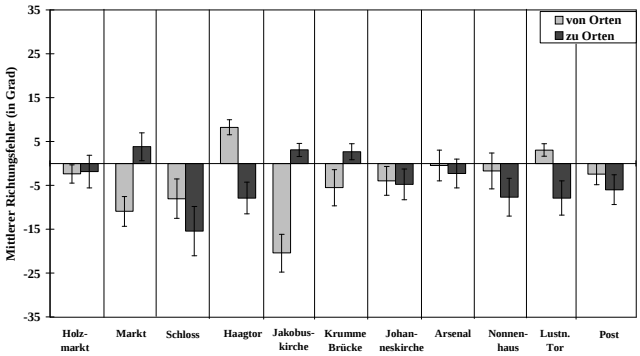

Abb. 82: andz

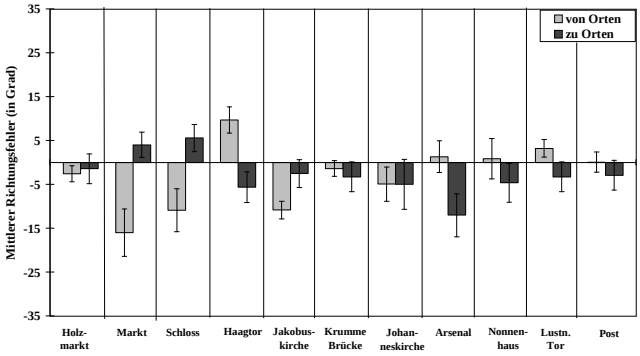

Abb. 83: chb

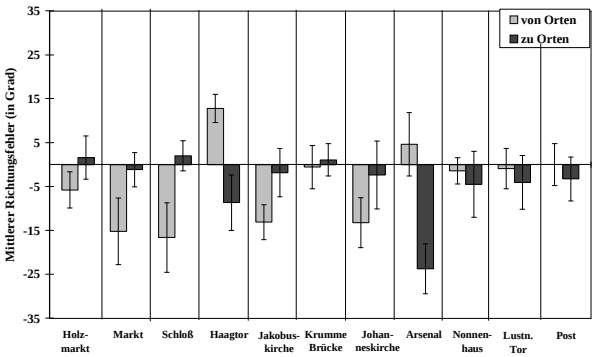

Abb. 84: chb

Reale Umgebung ***Virtuelle Umgebung***

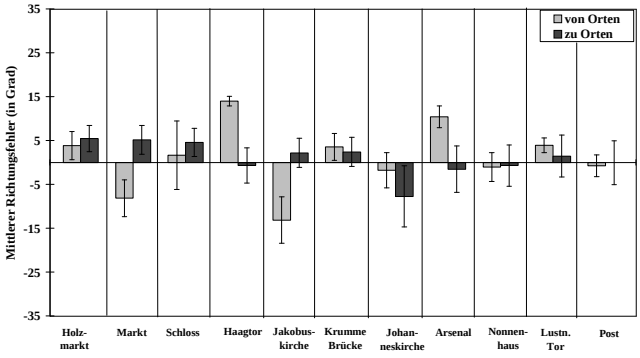

Abb. 85: kas

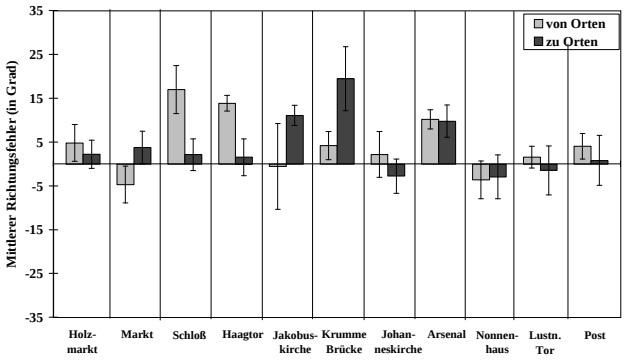

Abb. 86: kas

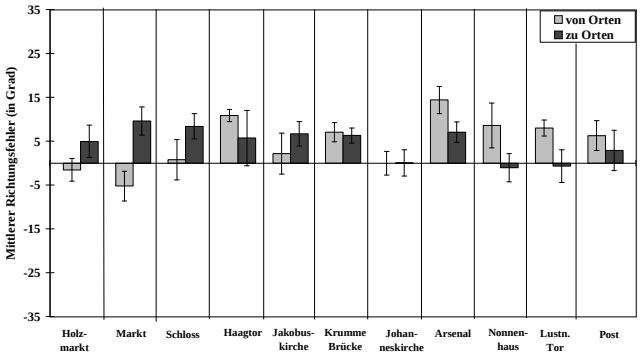

Abb. 87: kasz

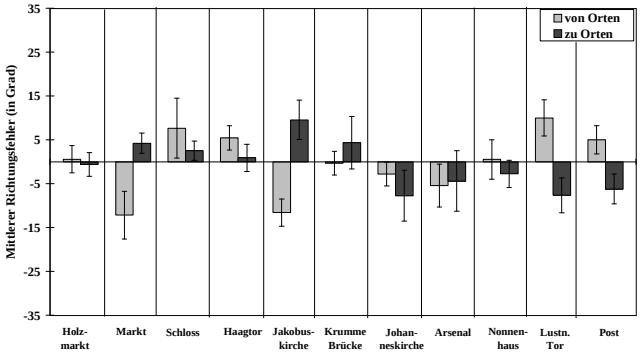

Abb. 88: mat

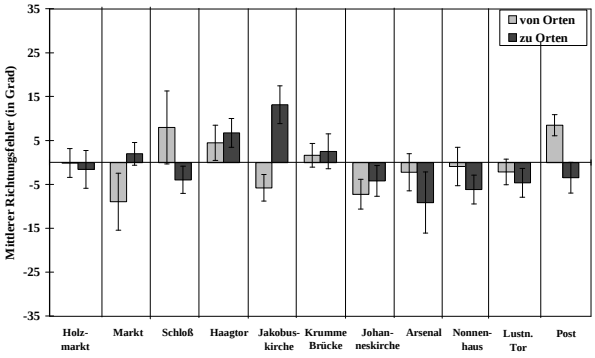

Abb. 89: mat

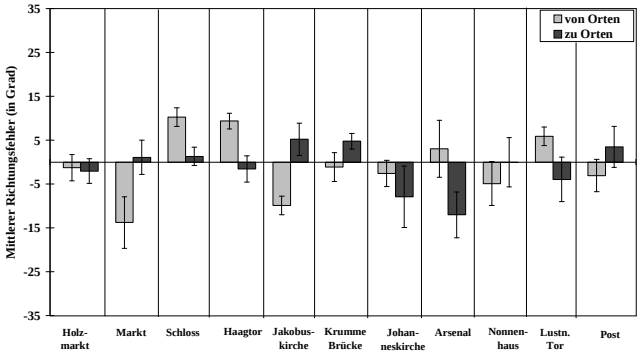

Abb. 90: ssh

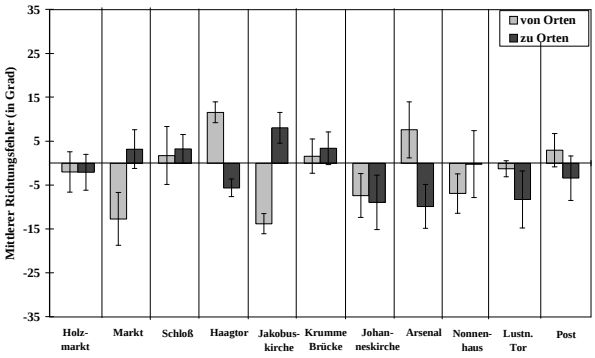

Abb. 91: ssh

Reale Umgebung

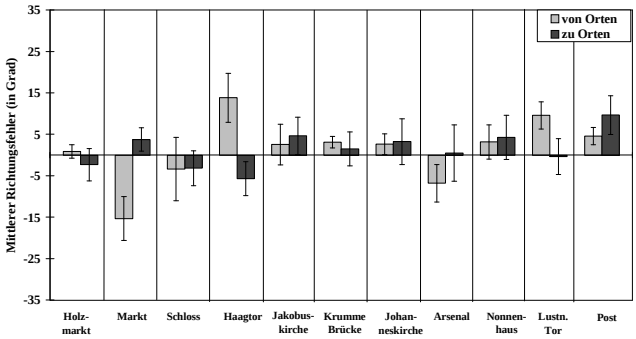

Abb. 92: uls

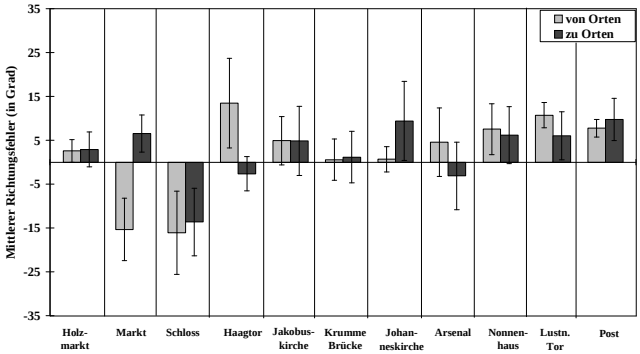

Abb. 94: ulsz

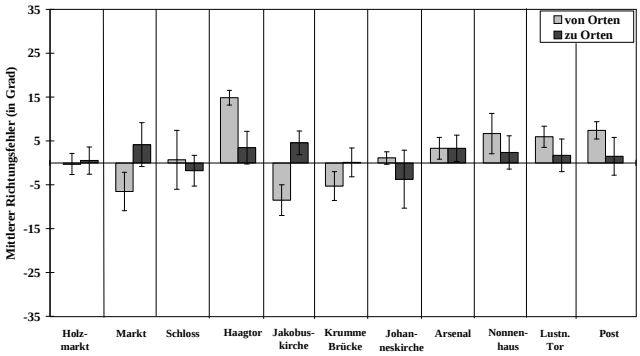

Abb. 95: vlb

Virtuelle Umgebung

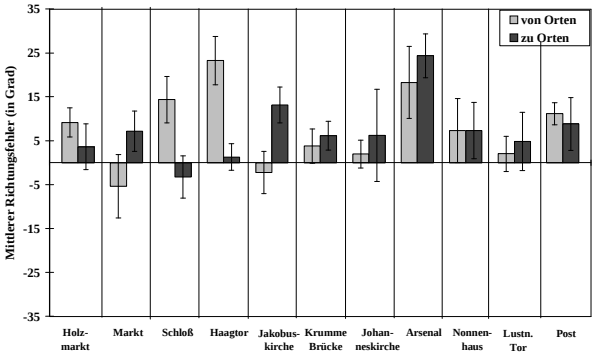

Abb. 93: uls

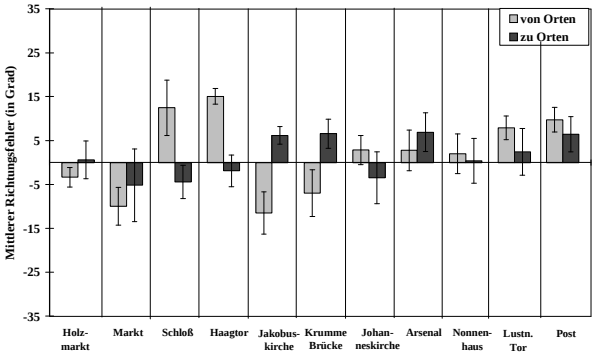

Abb. 96: vlb

Literaturverzeichnis

P. L. Alfano, G. F. Michel (1990) Restricting the field of view: perceptual and performance effects. *Perceptual and Motor Skills* 70, 35-45.

V. Aginsky, C. Harris, R. Rensink, J. Beusman (1996) *Two Strategies for learning a route in a driving simulator*. Technical Report CBR TR 96-6, Cambridge Basic Research, 4 Cambridge Center, Cambridge, Massachusetts 02142 USA.

G. L. Allen, A. W. Siegel, R. R. Rosinski (1978) The role of perceptual context in structuring spatial knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory* 4 (6), 617-630.

G. L. Allen, K. K. Kirasic, A. W. Siegel, J. F. Herman (1979) Developmental issues in cognitive mapping: the selection and utilization of environmental landmarks. *Child Development* 50, 1062-1070.

G. L. Allen, K. K. Kirasic (1985) Effects of the cognitive organization of route knowledge on judgments of macrospatial distance. *Memory & Cognition* 13(3), 218-227.

R. C. Allen, M. J. Singer (1997) Landmark direction and distance estimation in large scale virtual environments. *Proceedings of the Human Factors & Ergonomics Society*, 41st Annual Meeting, Albuquerque, NM.

L. J. Anooshian, D. Young (1981) Developmental Changes in Cognitive Maps of a familiar neighborhood. *Child Development* 52, 341-348.

R. Baker (1980) Goal orientation by blindfolded humans after long-distance displacement: Possible involvement of a magnetic sense. *Science* 210, 555-557.

R. Baker (1987) Human navigation and magnetoreception: the Manchester experiments do replicate. *Animal Behaviour* 35, 691-704.

C. A. Barnes (1988) Spatial learning and memory processes: The search for their neurobiological mechanisms in the rat. *Trends in Neuroscience* 11, 163-169.

C. A. Barnes, M. S. Suster, J. Shen, B. L. McNaughton (1997) Multistability of cognitive maps in the hippocampus of old rats. *Nature* 388, 272-275.

A. T. D. Bennett (1996) Do animals have cognitive maps? *Journal of Experimental Biology* 199, 219-224.

R. W. Byrne (1979) Memory for urban geography. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 31, 147-154.

B. A. Cartwright, T. S. Collett (1983) Landmark learning in bees. *Journal of Comparative Physiology* 151, 521-543.

B. A. Cartwright, T. S. Collett (1987) Landmark maps for honeybees. *Biological Cybernetics* 57, 85-93.

S. S. Chance, F. Gaunet, A. C. Beall, J. M. Loomis (1998) Locomotion mode affects the updating of objects encountered during travel: The contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 7(2), 168-178.

N. Chapuis, C. Thinus-Blanc, B. Poucet (1983) Dissociation of mechanisms involved in dogs' orientented displacements. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 35B, 213-219.

C. G. Christou, H. H. Bülthoff (im Druck) Using Virtual Environments to Study Spatial Encoding. In: *Proceedings of MIND III: Annual Conference of the Cognitive Science Society of Ireland, August 1998, Dublin*. John Benjamins Publishing Co., Amsterdam.

C. G. Christou, H. H. Bülthoff (angenommen) View dependence in scene recognition after active learning. Memory & Cognition.

R. Cohen, T. Schuepfer (1980) The representation of landmarks and routes. Child Development 51, 1065-1071.

H. A. Colle, G. B. Reid (1998) The room effect: Metric spatial knowledge of local and separated regions. *Presence: Teleoperators and virtual environments* 7 (2), 116-128.

T. S. Collett (1996) Insect navigation en route to the goal: multiple strategies for the use of landmarks. *Journal of Experimental Biology* 199, 227-235.

E. H. Cornell, C. D. Heth, W. L. Rowat (1992) Wayfinding by children and adults: response to instructions to use look-back and retrace strategies. *Developmental Psychology* 28(2), 328-336.

J. H. Cousins, A. W. Siegel, S. E. Maxwell (1983) Wayfinding and cognitive mapping in large-scale environments: a test of a developmental model. *Journal Experimental Child Psychology* 35, 1-20.

R. P. Darken, J. L. Sibert (1996) Navigating large virtual spaces. *International Journal of Human-Computer Interaction* 8(1), 49-72.

H. K. Distler, H.A.H.C. van Veen, S. Braun, H.H. Bülthoff (1997) Untersuchung komplexer Wahrnehmungs- und Verhaltensleitungen des Menschen in virtuellen Welten. Präsentiert auf dem *Workshop "Vom Bildschirm zum Handrad: Computer(be)nutzung nach der Desktop-Metapher", Forschungszentrum Arbeit und Technik, Universität Bremen,* 6-7 Oktober, Bremen, Germany

M. Egelhaaf, A. Borst (1993) Motion computation and visual orientation in flies. *Comparative Biochemistry & Physiology A - Comparative Physiology* 104(4), 659-673.

H. Eichenbaum, S. I. Wiener, M. L. Shapiro, N. J. Cohen (1989) The organization of spatial coding in the hippocampus: A study of neural ensemble activity. *Journal of Neuroscience* 9(8), 2764-2775.

R. Epstein, N. Kanwisher (1998) A cortical representation of the local visual environment. *Nature* 392, 598-601.

G. W. Evans (1980) Environmental Cognition. *Psychological Bulletin* 88(2), 259-287.

G. W. Evans, D. G. Morrero, P. A. Butler (1981) Environmental learning and cognitive mapping. *Environment and Behavior* 13(1), 83-104.

J. E. Foley, A. J. Cohen (1984) Working mental representations of the environment. *Environment and Behavior* 16(6), 713-729.

M. O. Franz, B. Schölkopf, H. Mallot, H. H. Bülthoff (1998). Learning View Graphs for Robot Navigation. *Autonomous Robots* 5(1), 111-125.

N. Fujita, R. L. Klatzky, J. L. Loomis, R. G. Golledge (1993) The encoding-error model of pathway completion without vision. *Geographical Analysis* 25, 295-314

N. Gale, R. G. Golledge, J. W. Pellegrino, S. Doherty (1990) The acquisition and integration of route knowledge in an unfamiliar neighborhood. *Journal of Environmental Psychology* 10, 3-25.

C. R. Gallistel (1990) *The organization of learning*. MIT Press, Cambridge (MA) .

S. Gillner (1997) *Untersuchungen zur bildbasierten Navigationsleistung in virtuellen Welten*. Dissertation, Fakultät für Biologie, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.

S. Gillner, H. A. Mallot (1998) Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of Cognitive Neuroscience* 10(4), 445-463.

M.D. Giraudo, J. Pailhous (1994) Distortions and fluctuations in topographic memory. *Memory & Cognition* 22, 14-26.

W. R. Glaser (1978) Varianzanalyse. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

S. E. Goldin, P. W. Thorndyke (1982) Simulating navigation for spatial knowledge acquisition. *Human factors* 24(4), 457-471.

M. A. Goodale, A. D. Milner (1992) Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences* 15, 20-25.

K. M. Gothard, W. E. Skaggs, K. M. Moore, B. L. McNaughton (1996) Binding of hippocampal CA1 neural activity to multiple reference frames in a landmark-based navigation task. *Journal of Neuroscience* 16(2), 823-835.

J. L. Gould, K. P. Able (1981) Human Homing: an elusive phenomenon. *Science* 212, 1061-1063.

D. A. Hardwick, C. W. McIntyre, H. L. Pick Jr. (1976) The content and manipulation of cognitive maps in children and adults. *Monographs of the Society for Research in Child Development* 41(3), 1-52.

H. Heft (1979) The role of environmental features in route-learning: two exploratory studies of way-finding. *Environmental Psychology and Nonverbal Behavior* 3(3), 172-185.

D. Henry (1992) *Spatial perception in virtual environments: Evaluating an architectural application*. Master Thesis, Science in Engineering, University of Washington.

J. F. Herman, L. M. Norton, C. A. Klein (1986) Children's distance estimates in a large-scale environment: A search for the route angularity effect. *Environment and Behavior* 18(4), 533-558.

J. F. Herman, J. A. Heins, D. S. Cohen (1987) Children's spatial knowledge of their neighborhood environment. *Journal of Applied Developmental Psychology* 8, 1-15.

T. Herrmann, K. Schweizer (1998) *Sprechen über Raum: sprachliches Lokalisieren und seine kognitiven Grundlagen*. Huber Verlag, Bern.

J. H. Howard, S. M. Kerst (1981) Memory and perception of cartographic information for familiar and unfamiliar environments. *Human factors* 23(4), 495-504.

S. M. Kosslyn (1988) Aspects of a cognitive neuroscience of mental imagery. Science 240, 1621-1626.

L. T. Kozlowski, K. J. Bryant (1977) Sense of direction, spatial orientation, and cognitive maps. *Journal of Experimental Psychology* 3(4), 590-598.

H. G. Krapp, R. Hengstenberg (1996) Estimation of self-motion by optic flow processing in single visual interneurons. *Nature* 384, 463-466.

J. M. Loomis, R. L. Klatzky, R. G. Golledge, J. G. Cicinelli, J. W. Pellegrino, P. A. Fry (1993) Nonvisual navigation by blind and sighted: assessment of path integration ability. *Journal of Experimental Psychology* 122, 73-91.

K. Lynch (1960) The image of the city. MIT Press, Cambridge (MA).

E. A. Maguire (1997) Hippocampal involvement in human topographical memory: evidence from functional imaging. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 352, 1475-1480.

E. A. Maguire, C. D. Frith, N. Burgess, J. G. Donnett, J. O'Keefe (1998) Knowing where things are: Parahippocampal involvement in encoding object locations in virtual large-scale space. *Journal of Cognitive Neuroscience* 10, 61-76.

R. Maurer, V. Séguinot (1995) What is modelling for? A critical review of the models of path integration. *Journal of Theoretical Biology* 175, 457-475.

M. May (1992) *Mentale Modelle von Städten: Wissenspsychologische Untersuchungen am Beispiel der Stadt Münster*. Waxmann, Münster.

M. May, F. Wartenberg (1995) Rotationen und Translationen in Umräumen: Modelle und Experimente. *Kognitionswissenschaft* 4, 142-153.

T. P. McNamara, J. A. Halpin, J. K. Hardy (1992) Spatial and temporal contributions to the structure of spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 18(3), 555-564.

B. L. McNaughton, L. B. Chen (1989) Cortical-hippocampal interactions and cognitive mapping: a hypothesis based on reintegration of the parietal and inferotemporal pathways for visual processing. *Psychobiology* 17 (3), 236-246.

R. Menzel, K. Geiger, L. Chittka, J. Joerge, J. Kunze, U. Müller (1996) The knowledge base of bee navigation. *Journal of Experimental Biology* 199, 141-146.

M. Mishkin, L. G. Ungerleider, K. A. Macko (1983) Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences* 6, 414-417.

H. Mittelstaedt (1998) Models of Navigation by Path Integration. *Proceedings of the 26th Göttingen Neurobiology Conference*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

I. Moar, G. H. Bower (1983) Inconsistency in spatial knowledge. *Memory & Cognition* 11(2), 107-112.

I. Moar, L.R. Carleton (1982) Memory for routes. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 34A, 381-394.

S. D. Moeser (1986) Cognitive mapping in a complex building. *Environment and Behavior* 20(1), 21-49.

R. G. Morris, P. Garrud, J. N. Rawlins, J. O'Keefe, (1982) Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions. *Nature* 297, 681-683.

R. U. Muller, J. L. Kubie (1987) The effects of changes in the environment on the spatial firing of hippocampal complex-spike cells. *Journal of Neuroscience* 7(7), 1951-1968.

R. U. Muller, M. Stead, J. Pach (1996) The hippocampus as a cognitive graph. *Journal of General Physiology* 107(6), 663-694.

R. Müller, H.-U. Schnitzler (1998) Demodulation and the evaluation of acoustic flow. *Proceedings of the 26th Göttingen Neurobiology Conference*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

J. O'Keefe, J. Dostrovsky (1971) The hippocampus as a spatial map: preliminary evidence from unit activity in the freely moving rat. *Brain Research* 34, 171-175.

J. O'Keefe, L.Nadel (1978) *The hippocampus as a cognitive map*. Clarendon Press, Oxford.

A. Okabe, K. Aoki, W. Hamamoto (1986) Distance and direction judgment in a large-scale natural environment: effects of a slope and winding trail. *Environment and Behavior* 18(6), 755-772.

M. J. O'Neill (1991) Evaluation of a conceptual model of architectural legibility. *Environment and Behavior* 23(3), 259-284.

M. J. O'Neill (1992) Effects of familiarity and plan complexity on wayfinding in simulated buildings. *Journal of Environmental Psychology* 12, 319-327.

D. S. Olton, J. T. Becker, G. E. Handelmann (1979) Hippocampus, space, and memory. *Behavioral & Brain Sciences* 2(3) 313-365.

P. Péruch, M. May, F. Wartenberg (1997) Homing in virtual environments: effects of field of view and path layout. *Perception* 26, 301-311.

P. Péruch, F. Gaunet (eingereicht) Virtual environments as a promising tool for investigating human spatial cognition. Eingereicht bei *Current Psychology of Cognition*.

M. Potel (1998) Motion sick in cyberspace. *IEEE Computer Graphics and Applications* 18(1), 16-21.

B. Poucet (1993) Spatial cognitive maps in animals: new hypotheses on their structure and neural mechanisms. *Psychological Review* 100(2), 163-182.

C. C. Presson, M. D. Hazelrigg (1984) Building spatial representations through primary and secondary learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 10(4), 716-722.

A. Rotenberg, R. U. Muller (1997) Variable place-cell coupling to a continuously viewed stimulus: evidence that the hippocampus acts as a perceptual system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* B 352, 1505-1513.

R. A. Ruddle, S. J. Payne, D. M. Jones (1997) Navigating buildings in "desk-top" virtual environments: experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied* 3(2), 143-159.

G. A. Satalich (1995) *Navigation and wayfinding in virtual reality: finding the proper tools and cues to enhance navigational awareness*. Master Thesis, University of Washington, USA.

H. U. Schnitzler, O. W. Henson Jr. (1980) Performance of airborne animal sonar systems. 1. Microchiroptera. In: R.G. Busnel, J.F. Fish (Ed.) *Animal sonar systems*. Plenum, New York, Seiten 109-181.

B. Schölkopf, H. A. Mallot (1995) View-based cognitive mapping and path planning. *Adaptive Behavior* 3(3), 311-348.

P. E. Sharp (1991) Computer simulation of hippocampal place cells. *Psychobiology* 19, 104-115.

A. W. Siegel, S. H. White (1975) The development of spatial representations of large-scale environments. In: H.W. Reese (Ed.), *Advances in Child Development and Behavior* 10, New York: Academic Press, 9-55.

M. J. Singer, R. C. Allen, D. P. McDonald, J. P. Gildea (1997) *Terrain appreciation in virtual environments: spatial knowledge acquisition*. Technical Report No. 1056, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Alexandria (Virginia).

A. Stevens, P. Coupe (1978) Distortions in judged spatial relations. *Cognitive psychology* 10, 422-437.

M. S. Tarsitano (1997) Araneophagic jumping spiders discriminate between detour routes that do and do not lead to prey. *Animal Behaviour* 53, 257-266.

J. S. Taube, R. U. Muller, J. B. Ranck (1990a) Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis. *Journal of Neuroscience* 10, 420-435.

J. S. Taube, R. U. Muller, J. B. Ranck (1990b) Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. II. Effects of environmental manipulations. *Journal of Neuroscience* 10, 436-447.

C. Thinus-Blanc (1996) *Animal spatial cognition: Behavioral & neural approaches*. World Scientific Publishing, Singapore.

P. W. Thorndyke, B. Hayes-Roth (1982) Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology* 14, 560-589.

M. Tlauka, P. N. Wilson (1996) Orientation-free representations from navigation through a computer-simulated environment. *Environment and Behavior* 28(5), 647-664.

E. C. Tolman (1948) Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review* 55, 189-208.

D. H. Uttal, H. M. Wellman (1989) Young children's representation of spatial information acquired from maps. *Developmental Psychology* 25(1), 128-138.

D. Varju (1998) *Mit den Ohren sehen und den Beinen hören: die spektakulären Sinne der Tiere*. Beck, München.

H. A. H. C. van Veen, H. K. Distler, S. J. Braun, H. H. Bülthoff (1998) Navigating through a virtual city: using virtual reality technology to study human action and perception. *Future Generation Computer Systems* 14, 231-242.

D. Waller, E. Hunt, D. Knapp (1998) The transfer of spatial knowledge in virtual environment training. *Presence* 7, 129-143.

T. H. Waterman (1990) *Der innere Kompass: Sinnesleistungen wandernder Tiere*. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg.

R. Wehner (1992) Arthropods. In: *Animal Homing*. F. Papi (Ed.), Chapman & Hall, London.

M. A. Wilson, B. L. McNaughton (1993) Dynamics of the hippocampal ensemble code for space. *Science* 261, 1055-1058.

P. N. Wilson, N. Foreman, M. Tlauka (1997) Transfer of spatial information from a virtual to a real environment. *Human Factors* 39(4), 526-531,

B. G. Witmer, J. H. Bailey, B. W. Knerr (1996) Virtual spaces and real world places: Transfer of route knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies* 45, 413-428.