

Wird die Ortserkennung durch die relativen
Distanzinformationen von
Landmarkenkonfigurationen bestimmt?

Bachelorarbeit
der Mathematisch- Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen

vorgelegt von
Amanda Link

Tübingen, April 2014

Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass ich diese Arbeit selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.
- dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist.

Tübingen, den 28.04.2014,

Amanda Link

Zusammenfassung

In diesem Experiment wurde der geometrische Einfluss von Landmarkenkonfigurationen auf die Ortserkennung des Menschen in virtuellen Umgebungen mit Hilfe zweier Landmarkenanordnungen im gleichen experimentellen Aufbau untersucht. Beide Versuchsgruppen mussten in der Experimentalphase einen, zuvor in der Lernphase inzidentell gelernten, Zielort wiederfinden. Es zeigte sich eine Streuung der gesetzten Entscheidungspunkte in Richtung der vom Ziel aus weiter entfernten Landmarken sowie das Vorkommen eines systematischen Versatzes vom wahren Zielort für die nicht symmetrische Landmarkenkonfiguration. Aus diesen Ergebnissen schlossen wir, dass die Versuchspersonen die relativen Distanzen zwischen Landmarken und Ziel zur Ortsfindung nutzten, sich jedoch nicht anhand geometrischer Gegebenheiten orientiert hatten. Die beobachtete Streckung der Verteilung der Entscheidungspunkte zu den fernen Landmarken führten wir auf die erhöhte Unsicherheit bei der Einschätzung größerer Distanzen zurück. Zudem vermuteten wir die Ursache für den systematischen Versatz in einem Rauschen des *spatial image*, welches beim Abspeichern entsteht.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	<u>1</u>
2 Methoden	<u>9</u>
2.1 Versuchspersonen	<u>9</u>
2.2 Apparatur und virtuelle Umgebung	<u>9</u>
2.2.1 Apparatur	<u>9</u>
2.2.2 Virtuelle Umgebung	<u>10</u>
2.3 Versuchsablauf	<u>13</u>
2.3.1 Lernphase	<u>14</u>
2.3.2 Experimentalphase	<u>14</u>
2.4 Datenerhebung und Auswertung	<u>15</u>
3 Ergebnisse	<u>16</u>
3.1 Entscheidungspunkte	<u>16</u>
3.2 Trajektorien	<u>19</u>
3.3 Startrichtungseffekt	<u>21</u>
3.4 Distanzeinschätzung	<u>25</u>
3.5 Geschlechter-Effekt	<u>27</u>
3.6 Beste Versuchspersonen	<u>28</u>
4 Diskussion	<u>30</u>
Literaturverzeichnis	41
Anhang	45

1 Einleitung

Die Ortserkennung gehört zu den wichtigsten Fähigkeiten des Menschen. Tagtäglich wird diese von Menschen als auch von Tieren beispielsweise beim Navigieren zu bestimmten Zielorten, dem Zurechtfinden in unbekanntem Umgebungen oder auch zum Auffinden von Futterquellen genutzt. Hierfür werden mentale räumliche Repräsentationen der Umgebung erstellt, die dem Organismus dabei helfen Orte voneinander abzugrenzen, wiederzuerkennen und zwischen diesen zu Navigieren. Bereits 1930 postulierten Tolman und Honzik (1930) die Existenz einer solchen räumlichen Repräsentation und etablierten den Begriff der kognitiven Karte. Sie wird als nicht metrische, mental vereinfachte Repräsentation der realen Umgebung verstanden, in der bestimmte Merkmale des Raumes abgespeichert sind. Eine ausführlichere Definition bot Mallot (2012), der die kognitive Karte als deklaratives Ortsgedächtnis bezeichnete, welches ein flexibles Reagieren von Organismen auf sich ändernde Umweltsituationen, beispielsweise Planen von Routen oder Transferieren von Wissen bekannter auf neue überlappende Routen, ermöglicht. Zudem ermöglicht sie latentes Lernen durch bloßes Erreichen von Zielen. Als Speicherort der kognitiven Karte deklarierten O'Keefe und Nadel in elektrophysiologischen Versuchen an Ratten (1978) sowie mit Menschen den Hippocampus (1979).

Neben der kognitiven Karte, dem deklarativen Ortsgedächtnis, spielt das Arbeitsgedächtnis insbesondere bei der lokalen Ortsrepräsentation eine wichtige Rolle. Eine, das Arbeitsgedächtnis betreffende, räumliche Repräsentation beim Menschen wird von Loomis et al. (2013) als *spatial image* bezeichnet. Es wird aus multisensorischen und sprachlichen Informationen sowie Inhalten der kognitiven Karte des Langzeitgedächtnisses im Arbeitsgedächtnis gebildet und kann vereinfacht auch als egozentrische Repräsentation der unmittelbaren Umgebung verstanden werden, die durch *spatial updating* aktualisiert wird. Merkt sich eine Versuchsperson die Position von Objekten in ihrer Umgebung, bewegt sich anschließend mit geschlossenen Augen in dieser und aktualisiert dabei die neu eingenommene Position der Objekte, handelt es sich um das sogenannte *spatial updating*, welches bei allen Menschen automatisch abläuft und nicht unterdrückt werden kann.

Ein wichtiger Bestandteil räumlicher Repräsentationen sind Landmarken. Sie dienen der Orientierung, Ortserkennung und Navigation. Ob eine Landmarke als solche bezeichnet werden kann, hängt von bestimmten Kriterien ab. Landmarken sind meist markante, weithin sichtbare Objekte, die gut von anderen Objekten unterscheidbar und somit

wiedererkennbar sind. Weiterhin sollten sie als Referenzpunkt eine Relevanz für die Wegentscheidung sowie eine gewisse Permanenz vorweisen (Cornell et al., 1989; Biegler & Morris, 1993). Nach dieser weitläufigen Definition müssen Landmarken nicht zwangsläufig benennbare Objekte sein (Gillner et al., 2008). Wie Janzen et al. (2004) oder auch Stankiewicz & Kalia (2007) zeigten, können sogar Winkel, in denen zum Beispiel zwei Korridore oder Straßen aufeinander treffen als solche genutzt werden. Laut Siegel und White (1975) kann jedoch auch eine Objektkonfiguration als Landmarke dienen. Dies fanden sie bei einem Experiment mit Kindern heraus, die den Grundriss einer zuvor besuchten Modellstadt aus dem Gedächtnis heraus rekonstruieren mussten. Je öfter sie diese durchliefen, desto akkurater wurden ihre Skizzen, was daran liegen könnte, dass die verwendeten Landmarken in Relation zueinander besser repräsentiert waren.

Den Gedanken der Landmarke in Form von Objektkonfigurationen fassten Cartwright und Collet (1983) auf und untersuchten in Experimenten mit Honigbienen deren Ortserkennungsfähigkeit mit Hilfe verschiedener Landmarkenanordnungen. Hierfür wurde den Honigbienen in der Lernphase eine Futterquelle inmitten verschiedener Landmarkenkonfigurationen in einem ansonsten reizlosen Raum dargeboten. In der Experimentalphase wurde die Futterquelle entfernt sowie Distanz zwischen Ziel und Landmarken bzw. deren Größe manipuliert. Der Winkel zwischen den Landmarken, vom Zielpunkt aus gesehen, war jedoch immer gleich. Änderte sich die Größe der Landmarken, suchten sie an dem Ort, an dem sich die Futterquelle zuvor befand. Sie reagierten also nicht auf die Veränderung der Landmarkengröße, sondern orientierten sich anhand der Winkel zwischen den Landmarken. Wurde die Distanz zwischen Landmarken und Ziel erhöht, wurde eine Verschiebung des Suchverhaltens in Richtung der Landmarken erwartet, während bei einer Verringerung die Suchregion in einer weiteren Entfernung zu den Landmarken vermutet wurde. Dieses Verhalten konnte allerdings nicht beobachtet werden. Stattdessen zeigten sie erneut ein Verhalten, dass auf die Verwendung der Winkel schließen ließ (Abb.1). Allerdings zeigten Experimente unter Verwendung einer einzigen Landmarke, dass die Größe dieser dennoch eine wichtige Rolle spielt. Eine Größenveränderung dieser hatte zur Folge, dass die Bienen an dem Ort suchten, an dem ihr retinales Bild dem zuvor am Zielort abgespeicherten Bild der Landmarke glich. Aus diesem Verhalten folgerten die Autoren, dass Bienen lediglich Größe und Ausrichtung der Landmarken aus Sicht der Futterquelle abspeicherten und entwickelten das sogenannte Schnappschuss-Modell. Dieses besagt, dass die Bienen zunächst am Zielort einen

sogenannten Schnappschuss der Umgebung abspeichern. Wollen sie die Futterquelle wiederfinden, vergleichen sie beim Flug fortwährend ihr retinales Bild mit dem abgespeicherten Schnappschuss, jedoch zunächst noch ohne die Landmarken nahe dem Ziel, sondern mit Hilfe der weiter entfernten Landmarken. Kommt es zur Annäherung an dieses, wird die Diskrepanz zwischen beiden Bildern immer geringer. Befindet sich die Biene in der näheren Umgebung des Ziels, wird der Schnappschuss, der nun die nahe positionierten Landmarken enthält, abgerufen und erneut die Diskrepanz des retinalen und des abgespeicherten Bildes auf ein Minimum reduziert. Auf diese Weise kann der genaue Zielort lokalisiert werden (Cartwright & Collet, 1987). Ähnliche Verhaltensbefunde wurden auch für viele andere Insekten gefunden, beispielsweise verschiedene Ameisenspezies (Wehner et al., 1996; Collet et al., 2003), Schwebfliegen (Collet & Land, 1975) oder Grabwespen (Tinbergen & Cruyt, 1938).

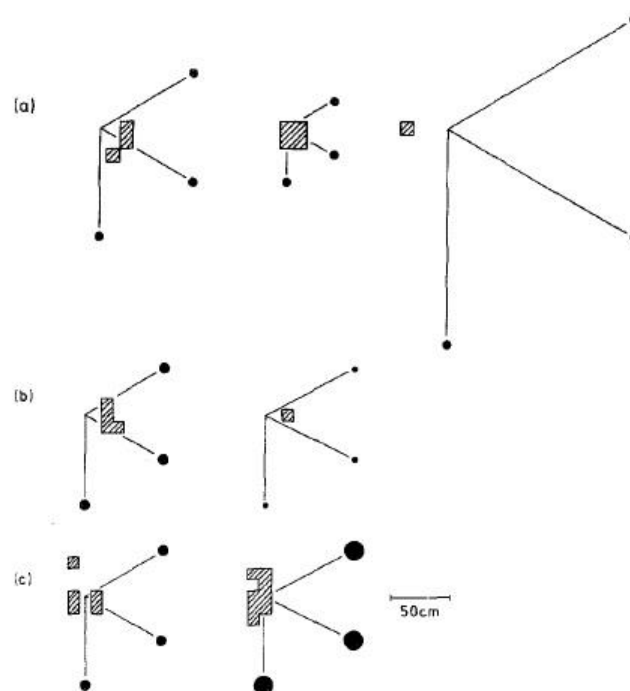


Abb. 1: Versuchsaufbau in Cartwright & Collets Versuchen.

Es wurden entweder die Distanz zwischen Landmarken und Ziel oder die Größe der Landmarken manipuliert. Links befinden sich die Anordnungen der Lernphase, rechts die der Experimentalphase. Die grauen Kästchen definieren die Bereiche, in denen die Biene die Futterquelle am längsten suchte. Dieser Versuch zeigte, dass die Winkel zwischen den Landmarken zur Orientierung wichtiger sind als die wahrnehmbare Größe der Landmarken.

a Die Landmarken hatten dieselben Winkel wie in der Lernphase. Lediglich die Distanz zur Futterquelle wurde halbiert oder verdoppelt.

b, c Die Größe der Landmarken wurde manipuliert. Die Bienen suchten an dem Ort, an dem die Winkel zwischen den Landmarken mit denen der Lernphase übereinstimmten.

Dass Menschen ein ähnliches Verhalten vorweisen, zeigten Gillner et al. (2008) in einem Ortserkennungsexperiment mit einem *Head-Mounted-Display* (HMD). Die Versuchspersonen sollten in einem Raum, der lediglich mit einem Farbgradienten versehen war, einen Ort, von dem aus sie zuvor hinweg teleportiert wurden, wiederfinden. Manipuliert wurden der Kontrast des Farbgradienten sowie die Größe des Raumes. Es zeigte sich eine Verschlechterung der Ortserkennungsleistung, sobald der Kontrast verringert und die Raumgröße maximiert wurden, was sich mit Voraussagen des Schnapsschussmodelles deckt. Ebenso wie Menschen, nutzen auch verschiedene andere Vertebraten wie Kiefernhäher (Kamil & Jones, 1997) oder Rennmäuse (Collet et al., 1986) das Schnapsschussmodell.

Das Wissen über die Wichtigkeit distaler Hinweise für die Ortserkennung geht bereits auf Experimente von Morris (1981) zurück. Er zeigte, dass Ratten lediglich mit Hilfe distaler Informationen einen Ort wiederfinden konnten. Das sogenannte *Morris-Water-Maze* (Abb. 2), ein Wasserbecken, gefüllt mit einer undurchsichtigen Flüssigkeit mit vier unterscheidbaren Wänden, enthielt entweder eine 1 cm über der Wasseroberfläche befindliche schwarze oder eine 1 cm unter der Wasseroberfläche befindliche weiße Plattform. Je nach Versuchsgruppe mussten die Ratten nun entweder die sichtbare oder die nicht sichtbare Plattform finden, die wiederum abhängig von der Versuchsgruppe ihre Position änderte oder am selben Ort lokalisiert blieb. Es zeigte sich, dass die Tiere nach einmaligem Auffinden der Plattform sehr schnell dazu in der Lage waren diese, auch von ungelerten Startpositionen aus, wiederzufinden. Das Experiment bewies, dass Ratten lediglich mit Hilfe distaler Hinweise einen Zielort wiederfinden konnten und proximale Hinweise nicht benötigten, die Performance jedoch verbesserten. Während distale Informationen die nicht direkt sichtbaren relativen Positionsverhältnisse verschiedener Orte oder Objekte zueinander beschreiben (Menzel, 1978), sind proximale Informationen durch ihre direkte Wahrnehmbarkeit durch Sinneseindrücke wie beispielsweise Sehen oder Riechen charakterisiert (Fraenkel & Gunn, 1961).

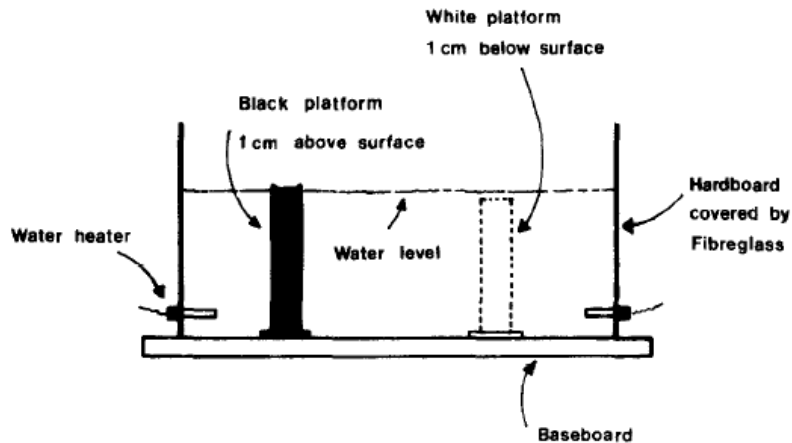


Abb. 2: Versuchsaufbau *Morris-Water-Maze*.

Die Ratten schwammen in einem, mit einer undurchsichtigen Flüssigkeit gefüllten, Becken. Abhängig von der Versuchsgruppe mussten sie entweder die schwarze oder die weiße Plattform lokalisieren.

Der Einfluss von distalen und geometrischen Informationen bei der Ortsfindung von Ratten wurde von Cheng untersucht (1986). Es stellte sich heraus, dass die Ratten den gesuchten Zielort wiederfanden, jedoch ein Teil diesen auch an seinem rotationssymmetrischen Äquivalent vermutete. An diesem Punkt stimmten zwar die geometrischen Informationen überein, allerdings unterschieden sich die nicht geometrischen Informationen, charakteristische Muster der Ecken, von denen am wahren Zielpunkt. Aus diesem systematischen Rotationsfehler folgerte Cheng, dass die Versuchstiere sich in erster Linie an den geometrischen Relationen der Umgebung orientierten und die nicht geometrischen Hinweise zwar codierten, jedoch den geometrischen Informationen unterordneten.

Waller et. al (2002) manipulierten die metrischen Informationen ihres Versuchsaufbaus, um den Einfluss von Distanzen und Winkeln von Landmarken bei der Ortserkennung von Menschen zu untersuchen. Die Versuchspersonen lernten einen Zielort im Verhältnis zu einer Landmarkenkonfiguration, welche in der Experimentalphase verändert wurde (Abb. 3). Es zeigte sich, dass die Distanz zu den einzelnen Landmarken einen größeren Effekt auf die Ortserkennung hatte als die Winkelinformationen zwischen diesen. Erst wenn mehrere orthogonale Winkel zwischen Betrachter und Landmarken existierten, wurden die Winkelinformationen vermehrt verwendet.

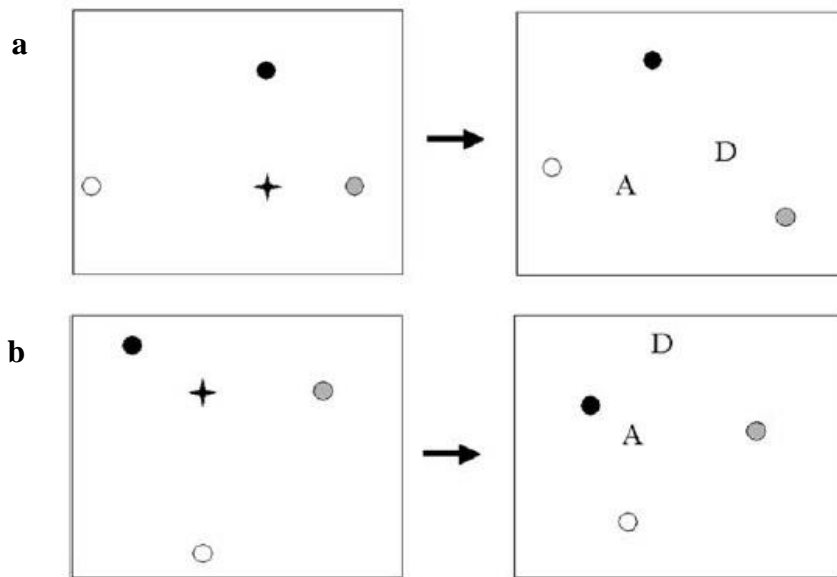


Abb.3: Landmarkenkonfigurationen der Trainings- und Experimentalphase bei Waller et al.

Bei diesem Versuch lernten die Versuchspersonen während der Lernphase (linke Bilder) einen bestimmten Zielort (Stern) in Relation zu drei umgebenden Landmarken (Kreise) und sollten diesen in der Experimentalphase (rechte Bilder), bei der die Landmarkenkonfiguration manipuliert wurde, wiederfinden.

a Bei dem mit *D* markierten Zielort blieb die Distanz zwischen Ziel und Landmarken in beiden Phasen unverändert, während an dem mit *A* markierten Zielort in beiden Phasen die Winkel zwischen Ziel und Landmarken unverändert blieben.

b *D* entsprach dem Zielort, an dem die Distanz zu den Landmarken gleich blieb, lag jedoch außerhalb deren Konfiguration, während *A* dem Zielort entsprach, an dem die Winkel zu den Landmarken unverändert waren.

Distanzen zu Landmarken und geometrischen Begrenzungen stellen, den vorliegenden Studien nach, einen wichtigen Faktor bei der Ortserkennung dar. Das korrekte Einschätzen verschiedener Distanzen zu Objekten wurde von Gilinsky (1951) untersucht. Sie stellte fest, dass hierbei vermehrt Fehler auftraten. Mit ansteigender Distanz wurde diese, bis zu einer bestimmten Grenze, immer mehr unterschätzt. Diese Ergebnisse decken sich mit denen jüngerer Studien, beispielsweise Philbeck und Loomis (1997), die dieselben Beobachtungen in ihren Experimenten, allerdings in kleineren Dimensionen, machen konnten. Zusätzlich zur Unterschätzung großer Distanzen, konnten Philbeck und Loomis sogar eine Überschätzung kleiner Distanzen beobachten. Diese Fehleinschätzung liegt vermutlich daran, dass visueller Raum und physikalischer Raum in ihren Dimensionen nicht übereinstimmen. Der physikalische Raum entspricht in seinen Dimensionen den realen, messbaren Distanzen, während der visuelle Raum die wahrnehmungsverzerrten Distanzen beinhaltet. Als Beispiel dient hier die Entfernung des Mondes zur Erde, welche von der Versuchsperson als kleiner wahrgenommen wird, als sie tatsächlich ist. So wird die reale Entfernung des Mondes von Gilinsky dem physikalischen, die verzerrte

Wahrnehmung dieser Distanz jedoch dem visuellen Raum zugeordnet, welcher unter anderem durch die maximal wahrnehmbare Distanz beeinflusst wird. Von besonderer Wichtigkeit ist demnach die Unterscheidung beider Räume, da der visuelle Raum kein realitätsgetreues Replikat der Umwelt, sondern eine verzerrte Transformation der physikalischen Gegebenheiten ist.

In früheren Bachelorarbeiten von Isa-Maria Gross und Marcel Dorer, wurden Ortserkennungsleistungen von Menschen untersucht (Gross, 2013; Dorer, 2013). Gross untersuchte den Einfluss verschiedener Lernformen auf die Ortsfindung, während Dorer die Landmarkengrößen manipulierte. Beide konnten einen systematischen Versatz der, von den Versuchspersonen, erkannten Orte vom eigentlichen Zielort vorfinden. Gross zeigte, dass bei der Versuchsgruppe, die den Zielort, ebenso wie unsere Versuchspersonen, inzidentell lernte ein systematischer Versatz vorzufinden war, während die Versuchspersonen, die das Ziel explizit lernten, einen individuellen mittleren Fehler aufwiesen. Die Mittelwerte der erkannten Orte waren isotropisch über dem eigentlichen Zielpunkt verteilt. Bei Dorers Experiment, der die gleiche Landmarkenkonfiguration wie Gross verwendete, wurden zwei Landmarken vergrößert und die gegenüberliegenden zwei verkleinert. Die Versuchspersonen suchten den Zielort an der Position, an der die retinale Größe der Landmarken mit deren Größen der Lernphase am Zielort übereinstimmte. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Honigbienenexperimente Cartwright und Collets (1983), kamen beide Autoren zu dem Schluss, dass sich die Versuchspersonen hauptsächlich an den Distanzen zu den Landmarken orientierten und benannten unter anderem die Landmarkenkonfiguration als möglichen Grund für den systematischen Versatz von der eigentlich zu lokalisierenden Position.

Um herauszufinden, warum es bei Ortserkennungsaufgaben oft zu systematischen Fehlern kommt und zu testen, ob die geometrische Anordnung von Landmarkenkonfigurationen hierbei einen Einfluss hat, werden in dieser Studie zwei verschiedene Landmarkenkonfigurationen im gleichen experimentellen Aufbau getestet. Bei der ersten Landmarkenkonfiguration handelt es sich um ein unregelmäßiges Viereck, bei dem eine Landmarke besonders weit vom gesuchten Zielpunkt entfernt ist. Aufgrund dieser Konstruktion, befinden sich Flächenschwerpunkt und Diagonalschnittpunkt der Landmarkenkonfiguration relativ weit auseinander. Falls der systematische Fehler tatsächlich von den relativen Distanzen der Landmarken zum Ziel abhängig ist und es einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Distanz und Wahrnehmung wie bei den Experimenten

von Gilinsky (1951) gibt, vermuten wir, dass es aufgrund der gewählten Konfiguration und Distanzen, zu einer sichtbaren Abweichung von diesen beiden geometrischen Zusammenhängen kommt. Für die Anordnung der Landmarken in Form des unregelmäßigen Vierecks erwarten wir also einen systematischen Versatz vom wahren Zielort in Richtung der weiter entfernten Landmarken sowie eine Streckung der Verteilung der von den Versuchspersonen gewählten Orte in deren Richtung. Die zweite Landmarkenkonfiguration entspricht einem Parallelogramm, bei dem Flächenschwerpunkt und Diagonalschnittpunkt dieselben Koordinaten haben. Hier erwarten wir eine Ortserkennung unmittelbar am Zielort, also keinen systematischen Versatz, sowie eine Streckung der Verteilung in Richtung der weiter entfernten Landmarken.

2 Methoden

2.1 Versuchspersonen

An diesem Experiment nahmen insgesamt 32 naive Versuchspersonen teil (15 weibliche und 17 männliche). In jeder der beiden Versuchsgruppen wurden 16 Personen getestet und zufällig auf beide Gruppen verteilt: in Versuchsgruppe „Parallelogramm“ neun männliche und sieben weibliche, in Versuchsgruppe „unregelmäßiges Viereck“ acht männliche und acht weibliche. Alle Teilnehmer waren Studenten der Eberhard-Karls Universität Tübingen im Alter zwischen 19 und 30 Jahren. Im Fall einer Sehschwäche trugen die Versuchspersonen eine Sehhilfe.

Vor Beginn des Versuches bekamen die Versuchspersonen sowohl eine mündliche als auch eine schriftliche Einweisung und mussten eine Einverständniserklärung zur Teilnahme am Experiment unterschreiben, welche dem Anhang zu entnehmen sind. Nach dem Experiment mussten sie einen, dem Muster von S. Münzer und C. Hölscher (2011) nachempfundenen, Fragebogen ausfüllen, bei dem sie unter anderem um eine Einschätzung ihrer räumlichen Orientierungsfähigkeit gebeten wurden (siehe Anhang). Das Experiment dauerte je nach Versuchsperson circa 30 bis 60 Minuten und wurde nach Beendigung mit acht Euro pro Stunde entlohnt.

2.2 Apparatur und virtuelle Umgebung

2.2.1 Apparatur

Das Experiment fand an einem Computer mit einem Intel® Core™ i3 CPU Prozessor und einer NVIDIA GeForce GTX560 Grafikkarte statt. Es wurde ein 30 Zoll Bildschirm mit einer Auflösung von 2560x1600 Pixeln, einer Bildschirmfrequenz von 60Hz und einem Bildschirmverhältnis von 16:10 verwendet. Die gezeigte virtuelle Umgebung wurde mit OpenSceneGraph®, die virtuellen Objekte mit MultiGenParadigm® erstellt. Als Compiler wurde VisualStudio®2008 verwendet.

Der Versuch wurde in einem abgedunkelten Raum durchgeführt, sodass die Versuchsperson den Bildschirm fokussieren und ihre Aufmerksamkeit zu keinem Zeitpunkt abgelenkt werden konnte. Der Abstand der Person zum Bildschirm betrug 60 cm (Sichtfeld 56,6°).

2.2.2 Virtuelle Umgebung

In der virtuellen Umgebung gab es einem unregelmäßig geformten See inmitten einer Grünfläche, der über eine kreuzförmige Brücke passierbar war. Die Grünfläche wies ebenso wie der hellgrau gefärbte Horizont keine Textur auf, welche eine Möglichkeit zur Orientierung hätte bieten können (Abb. 4). Einzig vier Landmarken in Form verschiedenfarbiger schwebender Kugeln (Blau, Gelb, Rot und Magenta) auf dem See dienten der Orientierung sowie Ortserkennung (Abb. 5).

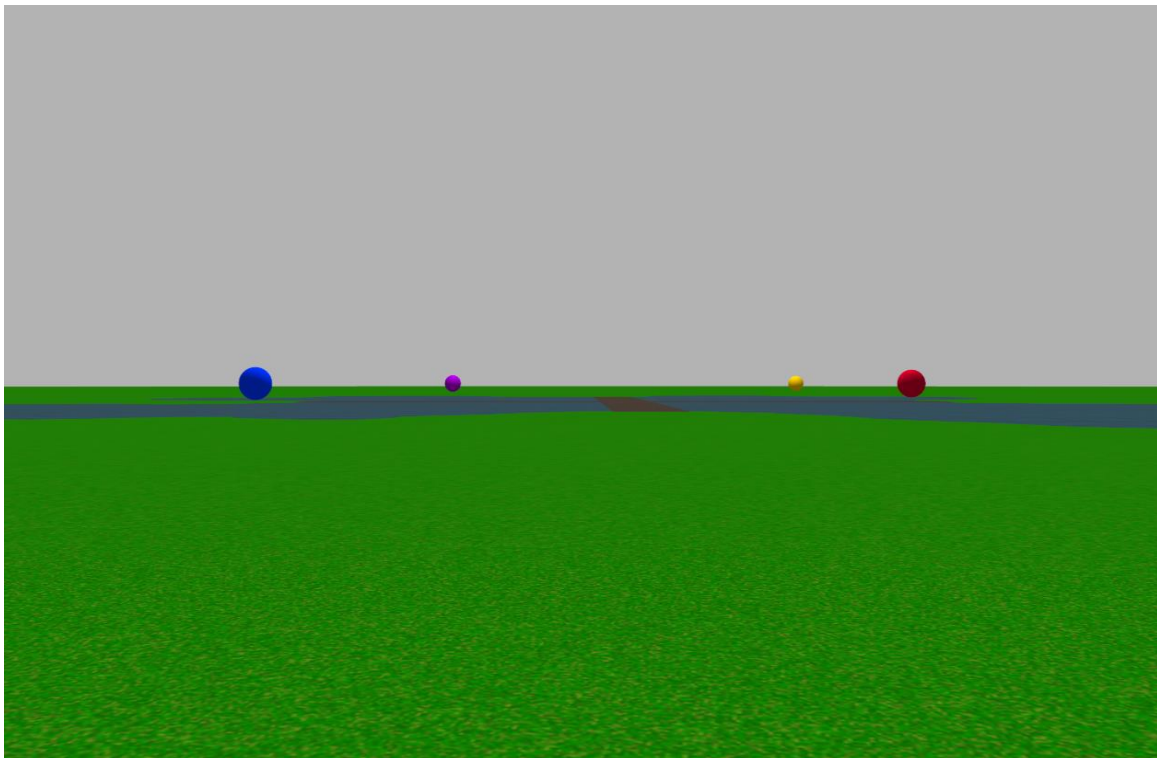


Abb. 4: Virtuelle Umgebung aus der Egoperspektive während der Lernphase mit Blick auf die Landmarkenkonfiguration.

Während der Lernphase konnten die Versuchspersonen die virtuelle Umwelt lediglich aus der Egoperspektive betrachten. Zu sehen waren sowohl der grau gefärbte Horizont, als auch See, Brücke und Landmarken.

Der Kreuzungspunkt der Brücke befand sich im Ursprung des Koordinatensystems, auf das die virtuelle Umgebung basierte. Der Maßstab der Objekte in dieser wurde so gewählt, dass eine Einheit einem Meter entsprach. Je nach Versuchsbedingung waren die Landmarken in Form eines Parallelogramms oder eines unregelmäßigen Vierecks angeordnet. Zudem wurde die Form des unregelmäßigen Vierecks so gewählt, dass Diagonalschnittpunkt und Flächenschwerpunkt weit auseinander lagen. Weiterhin war in beiden

Versuchsgruppen die Summe aller Distanzen vom Kreuzungspunkt der Brücke zu den jeweiligen Landmarken gleich groß.



Abb. 5: Bildliche Darstellung wichtiger Punkte der virtuellen Umgebung aus der Vogelperspektive.

Die Versuchspersonen mussten in der Lernphase von einer Startposition aus über die Brücke zu einem Ziel links oder rechts von dem See gelangen. Start- und Zielpositionen variierten in allen vier Himmelsrichtungen. In der Experimentalphase war der Brückenkreuzungspunkt (Entscheidungspunkt) das zu findende Ziel. Er ist hier mit einem Kreuz markiert. Die Landmarken sind wie im Versuch in den entsprechenden Farben eingezeichnet.

Bei der Landmarkenkonfiguration in Form eines Parallelogramms befanden sich die Landmarken an den Positionen Blau (25,25|32,75), Gelb (-25,25|-32,75), Rot (-20,25|22,75) und Magenta (20,25|-22,75), während bei der Anordnung als unregelmäßiges Viereck die Landmarken folgende Koordinaten aufwiesen: Blau (28,941|11,661), Gelb (-22,181|-14,861), Rot (-34,181|35,761) und Magenta (25,941|-25,361) (Abb. 6). Teng Leng Ooi und Zijiang J. He (2007) postulierten, dass die wahrgenommene Distanz aus dem trigonometrischen Zusammenhang zwischen Augenhöhe und Objekt ermittelt werden könne. Um diese Art der Distanzbestimmung auszuschließen, wurden die Mittelpunkte der Kugeln auf die gleiche Höhe wie das virtuelle Auge gesetzt (Höhe 1,80 m/ $\text{fovy}=43.8^\circ$ / $\text{zNear} = 0,8$).

Alle Landmarken besaßen einen Radius von 1 m sowie eine unsichtbare „Fangzone“ von 10 m Radius, bei deren Betreten die Versuchsperson wieder an die jeweilige Startposition zurück versetzt wurde. Die Startposition variierte in 5 m Schritten in einem Abstand von 90 bis 110,5 Metern zum Brückenkreuzungspunkt, dem Ursprung des gedachten Koordinatensystems. Weiterhin variierte sie beliebig in 2x5 m Schritten in Längs- sowie in Querrichtung nach links oder rechts, damit die Versuchsperson zu Beginn jedes Durchgangs nie direkt zur Brückenmitte ausgerichtet war. Insgesamt gab es also 4x20 mögliche Startpositionen. Die Länge beider Brückenelemente betrug 65 m mit einer Breite von 10 m. Sechzig Meter rechts bzw. links von dem Brückenkreuzungspunkt entfernt befand sich eine blaue Plattform, die während der Lernphase von den Probanden als Ziel angelaufen werden sollte und bereits ab einer Entfernung von 50 m sichtbar wurde. Diese erhob sich 0,3 m vom Boden und hatte einen Radius von 3 m. Das Ziel galt als erreicht, sobald der Proband sich in einem Radius von 5 m um die Plattform herum befand.

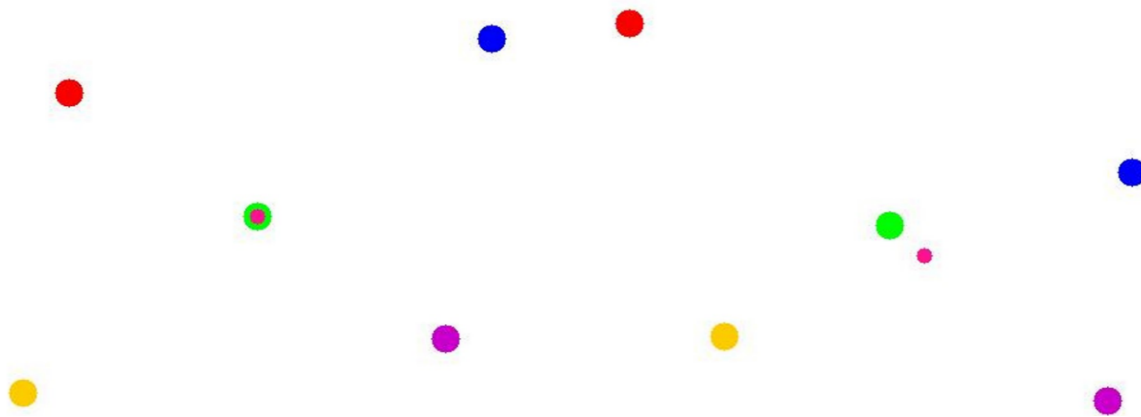


Abb. 6: Landmarkenkonfigurationen beider Versuchsgruppen.

Links ist die Landmarkenkonfiguration in Form des Parallelogramms zu sehen, rechts die Landmarkenkonfiguration in Form des unregelmäßigen Vierecks. Der grüne Punkt entspricht dem Flächenschwerpunkt, der pinke dem Diagonalschnittpunkt. Beide waren in der virtuellen Umgebung nicht sichtbar. Beim Parallelogramm haben beide Punkte dieselben Koordinaten und überschneiden sich deshalb.

Die Fortbewegung in der visuellen Umgebung erfolgte über die W-A-S-D Tastenkombination. Durch Drücken der W-Taste bewegte man sich vorwärts, mit der A-Taste nach links, mit der D-Taste nach rechts und mit der S-Taste rückwärts. Bei der Vorwärtsbewegung wurde eine Fortbewegungsgeschwindigkeit von 15 m/s, seitwärts eine Geschwindigkeit von 6 m/s erreicht. Die Blickrichtung des virtuellen Auges konnte durch Bewegen der Maus horizontal nach rechts oder links gelenkt werden, wobei eine Bewegung des Mauszeigers um einen Pixel eine Bewegung des virtuellen Auges um $0,1^\circ$ bewirkte.

2.3 Versuchsablauf

Es gab zwei Versuchsgruppen, die in ihrem Versuchsablauf identisch waren und sich lediglich durch ihre Landmarkenkonfiguration unterschieden. Zunächst wurde den Versuchspersonen der Aufbau der virtuellen Umgebung vermittelt. Ihnen wurde mitgeteilt, dass sie sich mit Hilfe der auf dem See befindlichen Landmarken orientieren sollten, wurden jedoch nicht über deren Konfigurationen in Kenntnis gesetzt. Weiterhin wurde darauf hingewiesen, dass in der Experimentalphase ein undurchsichtiger Bodennebel vorhanden sei, wodurch eine Orientierung ausschließlich über die Landmarken erfolgen musste. Zudem wurden sie darüber informiert, dass bereits während der Lernphase in unregelmäßigen Abständen ein Durchgang mit Bodennebel zu bewältigen sei, um sich an diesen zu gewöhnen (Abb.7). Der Versuchsleiter war während des gesamten Versuchs im Raum anwesend.



Abb.7: Virtuelle Umgebung aus der Egoperspektive während der Experimentalphase.

Während jedes Durchgangs der Experimentalphase wurde die Szenerie der virtuellen Umgebung von Bodennebel bedeckt, sodass lediglich die Landmarken sichtbar und eine Orientierungsleistung nur mit deren Hilfe möglich war. Der Bodennebel besaß dieselbe Graustufe wie der Horizont und war strukturlos, sodass die Horizontkante nicht sichtbar war.

2.3.1 Lernphase

Während der Lernphase erhielten beide Versuchsgruppen die Anweisung ein Ziel anzulaufen. Dieses befand sich abhängig von der jeweiligen Startposition entweder auf der linken oder rechten Seite des Sees. In welcher Richtung dieses Ziel lag, wurde vor Beginn jedes Durchgangs eingeblendet („Das Ziel befindet sich rechts vom See“). Die Versuchspersonen wurden instruiert das Ziel zu erreichen, indem sie die Brücke nutzten um möglichst nicht ins Wasser zu fallen. Während sie die Brücke passierten, lernten sie den Brückenkreuzungspunkt inzidentell. Dass sie diesen in der Experimentalphase aufsuchen sollten, wurde den Versuchspersonen zu diesem Zeitpunkt nicht mitgeteilt.

Die Lernphase bestand aus 12 Durchgängen. Die Versuchsperson startete jedes Mal aus einer anderen Richtung (Nord, Ost, Süd oder West). Es gab drei Durchgänge für jede der vier Himmelsrichtungen, wobei je ein Durchgang pro Richtung unter der Experimentalbedingung, also mit Bodennebel, durchgeführt wurde. Nach Beendigung eines Durchgangs wurden die Versuchspersonen an die nächste Startposition versetzt und konnten den nächsten absolvieren.

2.3.2 Experimentalphase

Unmittelbar auf die Lernphase folgte die Experimentalphase, die aus 48 Durchgängen bestand. Es wurde je zwölfmal aus den vier Himmelsrichtungen gestartet, jedoch war in jedem Durchgang Bodennebel vorhanden, sodass eine Orientierung während der gesamten Experimentalphase nur anhand der vier Landmarken möglich war. Erst zu Beginn der Experimentalphase erfuhren die Versuchspersonen, dass sie nicht wie in der Lernphase ein Ziel neben dem See, sondern stattdessen den Brückenkreuzungspunkt finden sollten. Auch hier wurde diese Anweisung wieder vor jedem Durchgang eingeblendet („Finde den Kreuzungspunkt der Brücke“). Wenn die Versuchsperson den Eindruck hatte, dass der Brückenkreuzungspunkt erreicht wurde, sollte sie die linke Maustaste drücken, um ihre Entscheidung zu bestätigen. Im Folgenden wird der Brückenkreuzungspunkt als Entscheidungspunkt bezeichnet. Zu keinem Zeitpunkt des Versuches wurde der Versuchsperson ein Feedback gegeben, sodass kein Lernprozess stattfinden konnte.

2.4 Datenerhebung und Auswertung

Während des gesamten Experiments wurden zu jedem Zeitpunkt die genaue Position der Versuchsperson in der virtuellen Umgebung sowie die gesetzten Entscheidungspunkte in Form von X- und Y-Koordinaten aufgezeichnet. Da es vorkam, dass Entscheidungspunkte z.B. durch unabsichtliches Drücken der Maustaste an der Startposition gesetzt wurden, eliminierten wir diese aus dem Datensatz. Es wurden weiterhin alle Punkte entfernt, die sich außerhalb der viereckigen Landmarkenkonfiguration befanden. Punkte, die unter dieses Ausschlusskriterium fielen, wurden eliminiert, da diese auf keine Orientierungsleistung anhand der Landmarken zurückzuführen waren. Nur außerhalb der Konfiguration waren alle Landmarken sichtbar, während sich innerhalb dieser nur jeweils eine Landmarke im Sichtfeld der Versuchsperson befand. Hätte eine Orientierung mit Hilfe der Landmarken stattgefunden, wäre es aufgrund dieses Sachverhalts nicht zu einem Setzen der Entscheidungspunkte außerhalb der Konfiguration gekommen. Weiterhin wurden die Blickrichtung in Grad und die Zeit in ms aufgezeichnet, jedoch nicht ausgewertet. Mit Hilfe von Matlab R2013a® und IBM SPSS Statistics20® wurden die Daten ausgewertet und die Statistik durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Entscheidungspunkte

In der Experimentalphase mussten die Versuchspersonen den Brückenkreuzungspunkt finden, der hier als Entscheidungspunkt bezeichnet wird (Abb. 5). Dieser diente als Maß für die Bestimmung der Ortserkennungsleistung in der virtuellen Umgebung. Weiterhin beschrieb eine Fehlerellipse über die Länge der Hauptachsen sowie deren Orientierung die Streuung der Daten.

Man kann in Abb. 8 erkennen, dass sich die Entscheidungspunkte beider Versuchsgruppen um bestimmte Punkte herum gruppieren. Bei der Versuchsgruppe mit der Landmarkenkonfiguration in Form eines Parallelogramms, gruppieren sich die Entscheidungspunkte um den eigentlichen Brückenkreuzungspunkt herum. Mit Hilfe eines Hotelling-Tests konnte festgestellt werden, dass der Mittelwert der Entscheidungspunkte nicht signifikant unterschiedlich zum Brückenkreuzungspunkt war ($T^2(16)=0,4127$, $p<0,8270$). Weiterhin waren die Mittelwerte auch nicht signifikant unterschiedlich zu Flächendiagonale und Geradenschnittpunkt des Parallelogramms, welche ebenfalls auf dem Brückenkreuzungspunkt lagen. In der Versuchsgruppe mit der Landmarkenkonfiguration in Form eines unregelmäßigen Vierecks, war ein signifikanter Versatz des Mittelwerts der Entscheidungspunkte zum Brückenkreuzungspunkt zu erkennen ($T^2(16)=55,8732$, $p<0,001$). Die Hauptachsen der Fehlerellipsen kreuzten sich im zweiten Quadranten. Auch war der Mittelwert signifikant unterschiedlich zur Flächendiagonale und dem Geradenschnittpunkt des unregelmäßigen Vierecks (Flächendiagonale: $T^2(16)=60,2460$, $p<0,001$, Geradenschnittpunkt: $T^2(16)=121,6723$, $p<0,001$). Weiterhin wurden bei einem unabhängigen Hotelling-Test die Mittelwerte der Entscheidungspunkte beider Versuchsgruppen gegeneinander getestet, welche demnach signifikant unterschiedlich zueinander waren ($T^2(16)=15,4422$, $p\text{-Wert}=0,0034$).

Abb. 9 kann man die Mittelwerte der einzelnen Versuchspersonen sowie die Standardabweichung der Versuchsgruppe entnehmen. Es war eine Verteilung der gesetzten mittleren Entscheidungspunkte in Richtung der weiter entfernten Landmarken sowie beim unregelmäßigen Viereck ein deutlicher Versatz zur Brückenmitte festzustellen. Die Streuung der Werte war bei beiden Versuchsgruppen vergleichbar groß. Die

Standardabweichung (STD) beim Parallelogramm betrug $STD=(1,763 \mid 2,6135)$, die des unregelmäßigen Vierecks $STD=(2,8695 \mid 3,0614)$.

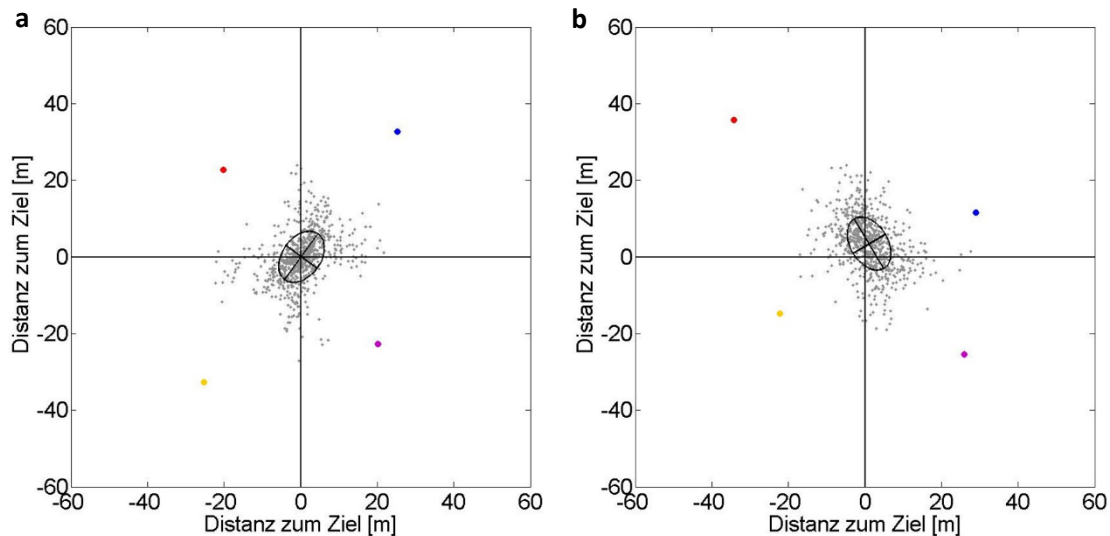


Abb. 8: Entscheidungspunkte beider Gruppen.

Die grauen Punkte stellen die von allen Versuchspersonen gesetzten Entscheidungspunkte dar. Die Fehlerellipse ist schwarz eingezeichnet. Die Landmarken (Rot, Blau, Magenta und Gelb) waren den Versuchsgruppen entsprechend angeordnet.

a Beim Parallelogramm kreuzten sich die Hauptachsen der Fehlerellipse auf dem Brückenkreuzungspunkt. Es war kein Versatz vorhanden ($n=16$, Entscheidungspunkte (EP)=742).

b Beim unregelmäßigen Viereck gab es einen Versatz der Fehlerellipse zum Brückenkreuzungspunkt. Die Hauptachsen schnitten sich im zweiten Quadranten ($n=16$, EP=756).

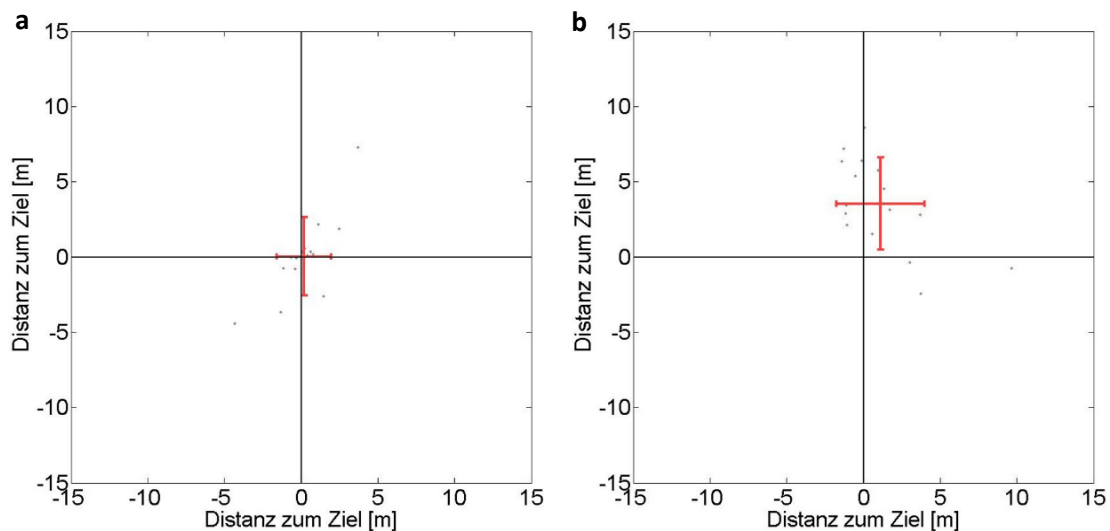


Abb. 9: Mittelwerte der Entscheidungspunkte aller Versuchspersonen und Standardabweichung für beide Gruppen.

Die grauen Punkte entsprechen den Mittelwerten der Entscheidungspunkte der jeweiligen Versuchspersonen ($n=16$). Rot eingezeichnet ist die Standardabweichung in x- und y-Richtung, deren Ursprung im Mittelwert der Entscheidungspunkte aller Versuchspersonen liegt.

a Beim Parallelogramm ist kein Versatz vom Brückenkreuzungspunkt vorhanden. Die Standardabweichung ist etwas geringer als die des unregelmäßigen Vierecks ($STD=(1,763 \mid 2,6135)$).

b Beim unregelmäßigen Viereck ist ein deutlicher Versatz des Mittelwerts der Entscheidungspunkte aller Versuchspersonen zum Brückenkreuzungspunkt zu sehen ($STD=(2,8695 \mid 3,0614)$).

Auffällig war zudem die Orientierung und Form der Fehlerellipsen in beiden Versuchsgruppen. Sie streckten sich der Landmarkenkonfiguration anpassend in Richtung der weiter entfernten Landmarken. In Abb. 10 wurden die Hauptachsen aller Versuchspersonen der jeweiligen Gruppe sowie die Hauptachse der Fehlerellipse aller Entscheidungspunkte eingezeichnet. Auch hier konnte man in beiden Fällen die Orientierung und die Streckung zu den weiter entfernten Landmarken sowohl für die einzelnen als auch für die Gesamthauptachse erkennen. Weiterhin war die Länge der Achsen der einzelnen Versuchspersonen einzusehen, welche auf die Fehlersituation zurückschließen ließ. Ein t-Test zeigte, dass die Versuchspersonen nicht direkt auf eine der beiden weiter entfernten Landmarken ausgerichtet waren (Parallelogramm für beide Landmarken: $p < 0,001$, unregelmäßiges Viereck für beide Landmarken: $p < 0,001$). Für einen Binomialtest wiesen wir jeder Landmarke einen Sektor zu, der sich aus der Hälfte des Winkels zu den benachbarten Landmarken vom Brückenkreuzungspunkt aus gesehen ergab. Somit konnte eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Hauptachsen in Richtung der weiter entfernten Landmarke ausgerichtet waren. Dazu wurden die Hauptachsen der Versuchspersonen den Sektoren der Landmarken, in deren Richtung sie zeigten, zugewiesen und mit einem Testanteil von 50% geprüft, ob die Hauptachsen in die beiden Sektoren der weiter entfernten Landmarken zeigten ($p < 0,001$).

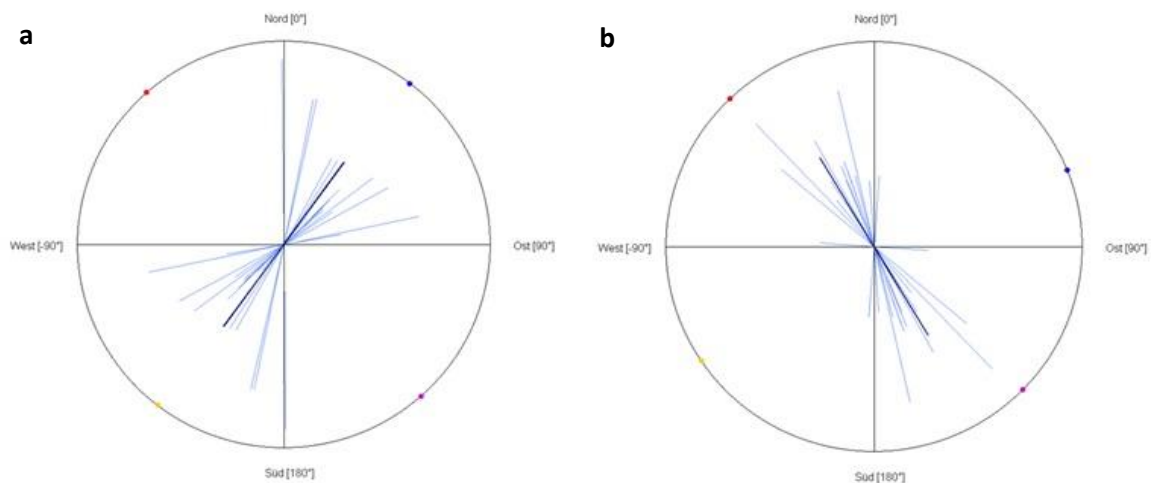


Abb. 10: Hauptachsen der Fehlerellipsen aller Versuchspersonen für beide Gruppen.

In Hellblau wurden die Hauptachsen der einzelnen Versuchspersonen aufgetragen. Die dunkelblaue Linie zeigt die Hauptachse der Fehlerellipse aller Entscheidungspunkte. Die jeweilige Landmarken- und Hauptachsenorientierung sowie die Länge der Hauptachsen sind ersichtlich.

a Beim Parallelogramm zeigte die Hauptachse aller Versuchspersonen in Richtung der weiter entfernten Landmarken (Blau und Gelb).

b Beim unregelmäßigen Viereck zeigten sowohl die einzelnen als auch die Hauptachse aller Versuchspersonen in den entsprechenden Sektor, jedoch nicht direkt auf die weiter entfernten Landmarken (Rot und Magenta).

3.2 Trajektorien

Um die Laufwege der Versuchspersonen während der Experimentalphase pro Durchgang nachvollziehen zu können, wurde für beide Versuchsgruppen eine sogenannte Heatmap erstellt. Für die Erstellung dieser wurde in einem Bereich von 120x120m um den Brückenkreuzungspunkt die virtuelle Umgebung in 1x1m große Felder aufgeteilt. Mittels Farbcodierung konnten die Häufigkeiten mit denen sich alle Versuchspersonen in diesen Feldern befanden, anschaulich dargestellt werden (Abb. 11).

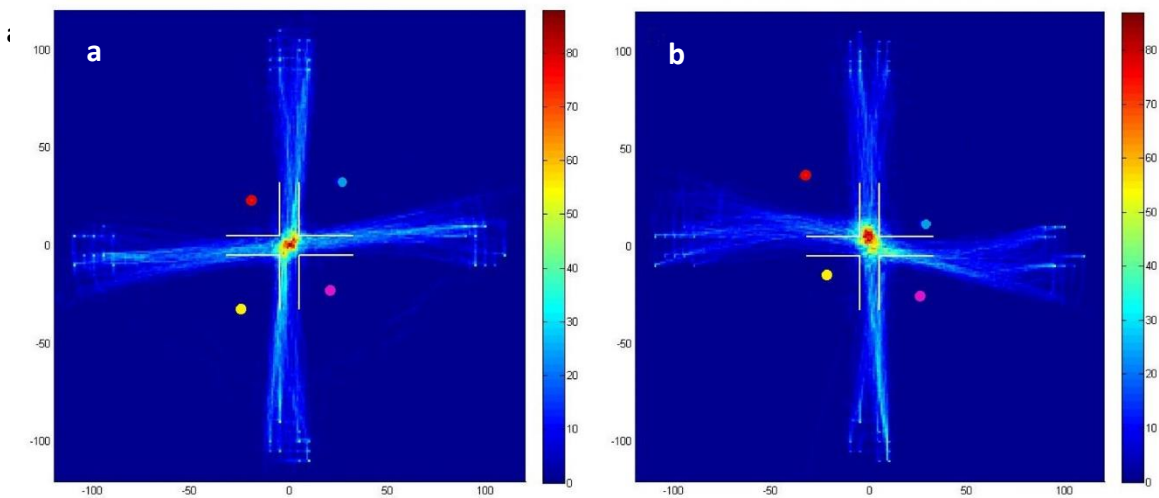


Abb. 11: Heatmaps der Aufenthaltshäufigkeiten beider Versuchsgruppen.

Die Heatmap zeigt die Häufigkeit an, mit der sich die Versuchspersonen in den 1x1m großen Feldern befunden haben. So sind die Laufwege während der Experimentalphase nachvollziehbar. Es wurden die Trajektorien aller Versuchspersonen für beide Gruppen eingezeichnet.

a Beim Parallelogramm ähnelt der Bereich mit den höchsten Aufenthaltshäufigkeiten dem Bereich der Fehlerellipse aus Abb. 8.

b Auch beim unregelmäßigen Viereck befindet sich der Bereich mit den höchsten Aufenthaltshäufigkeiten im Bereich der dazugehörigen Fehlerellipse aus Abb. 8.

Die Felder mit den höchsten Aufenthaltshäufigkeiten befanden sich beim Parallelogramm am Brückenkreuzungspunkt und beim unregelmäßigen Viereck etwas von diesem aus nach oben versetzt. Sie lagen in ähnlichen Bereichen wie die Fehlerellipse in Abb. 8. Somit ist der, von der Gruppe unregelmäßiges Viereck begangene, Versatz in y-Richtung in den Laufwegen angedeutet, wenn auch der in der Fehlerellipse von Abb. 8 vorhandene Versatz in x-Richtung fehlt. Zudem zeigten die Laufwege, dass die Versuchspersonen nicht dem Brückenverlauf folgten, sondern versuchten die jeweils flankierenden Landmarken mittig zu durchlaufen. Hierfür wurde die Bewegungsrichtung so angepasst, dass beide Landmarken seitlich der Versuchsperson in etwa gleich groß waren. Dies ist vor allem beim unregelmäßigen Viereck anhand der gewellten Laufwege aus östlicher und westlicher

Startrichtung erklärbar. Um die Landmarken mittig durchlaufen zu können, war eine größere Auslenkbewegung notwendig als beim Durchqueren dieser aus nördlicher und südlicher Startrichtung, aus deren Trajektorien der Brückenverlauf nachvollzogen werden kann. Weiterhin sind beim unregelmäßigen Viereck die Trajektorien weiter aufgefächert als beim Parallelogramm, was darauf hindeutet, dass diese Versuchsgruppe keine bevorzugte Strecke verwendete. Beim Parallelogramm sind die Laufwege der Versuchspersonen hingegen klarer definiert. Die Trajektorien dieser Versuchsgruppe passen sich der Scherung des Parallelogramms besonders gut an.

3.3 Startrichtungseffekt

Auffällig waren Ausläufer der Entscheidungspunkte in Richtung der vier Himmelsrichtungen. Um zu überprüfen, ob es eine Abhängigkeit beim Setzen der Entscheidungspunkte aus den jeweiligen Startrichtungen gab, wurden die Entscheidungspunkte nach diesen aufgeteilt und deren Fehlerellipsen aufgetragen (Abb. 12). In beiden Gruppen war eine partielle Überlagerung der Fehlerellipsen zu beobachten. Beim unregelmäßigen Viereck war eine größere Streuung vorhanden als beim Parallelogramm. Die Entscheidungspunkte sowie die dazugehörigen Fehlerellipsen lagen in beiden Gruppen auf den Achsen aus den jeweiligen Himmelsrichtungen und waren zu den Startrichtungen hin verlängert. Weiterhin spiegelten sich die verschiedenen Orientierungen der Vierecke beider Versuchsgruppen, nämlich beim Parallelogramm in Richtung Nordost bzw. Südwest und beim unregelmäßigen Viereck in Richtung Nordwest bzw. Südost, in der Orientierung der Fehlerellipsen wieder.

Mit Hilfe eines Hotelling-Tests wurden jeweils die Startrichtungen Nord und Süd sowie Ost und West für beide Gruppen gegeneinander getestet, um einen eventuellen Startrichtungseffekt zu untersuchen. Da sich ein entsprechender Startrichtungseffekt besonders stark auf die gegenüberliegende Startrichtung auswirken würde, wurden nur die beiden gegenüberliegenden Himmelsrichtungspaare getestet. Sowohl die Mittelwerte der Entscheidungspunkte der Richtungspaare Nord/Süd als auch die von Ost/West waren in beiden Gruppen signifikant unterschiedlich zueinander. Die Mittelwerte der Entscheidungspunkte unterschieden sich demnach in beiden Gruppen abhängig von den jeweiligen Startpositionen (Nord/Süd Parallelogramm: $T^2(16)=15,4422$, p-Wert=0,0071), Ost/West Parallelogramm: ($T^2(16)=9,8887$, p-Wert=0,0289), Nord/Süd unregelmäßiges Viereck: ($T^2(16)=18,5441$, p-Wert=0,0036), Ost/West unregelmäßiges Viereck: ($T^2(16)=14,2793$, p-Wert=0,0093)).

Ebenso wie bei den Fehlerellipsen waren die Mittelwerte in Richtung der jeweils weiter entfernten Landmarken gestreckt. Für die Startrichtungen Nord und Süd gab es beim Parallelogramm eine große Standardabweichung in Richtung der y-Achse, während für die Startrichtungen Ost und West eine höhere Streuung der Werte in x-Richtung zu beobachten war (STD Nord=(1,6036 | 6,1958), STD Ost=(5,2604 | 3,4493), STD Süd=(1,8996 | 5,8900), STD West=(5,5693 | 3,4385)). Beim unregelmäßigen Viereck hingegen waren lediglich die Werte für Süd auffällig, da es eine große Streuung der Werte

in y-Richtung gab (STD Nord=(3,2201 | 3,3292), STD Ost=(3,6971 | 3,6974), STD Süd=(3,1622 | 6,7636), STD West=(4,5296 | 3,3292)) (Abb. 13).

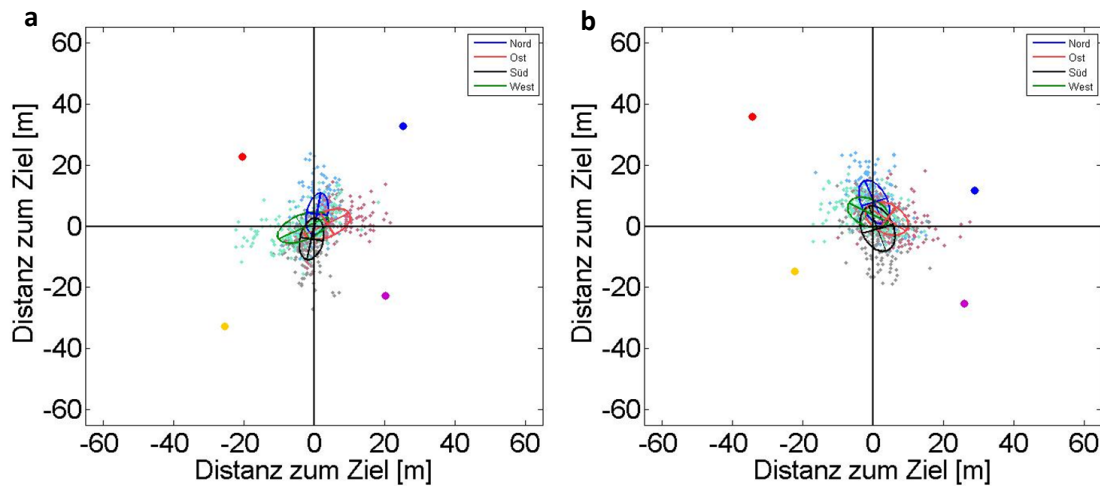


Abb.12: Abhängigkeit der Entscheidungspunkte von der Startposition.

Die Fehlerellipsen geben jeweils die Verteilung der Entscheidungspunkte an, die von den verschiedenen Startrichtungen aus kommend, gesetzt wurden: Norden (Blau), Osten (Rot), Süden (Schwarz) und Westen (Grün).

a Beim Parallelogramm überschneiden sich die vier startpositionsabhängigen Fehlerellipsen auf dem Brückenkreuzungspunkt und strecken sich den jeweiligen weiter entfernten Landmarken länglich entgegen.

b Beim unregelmäßigen Viereck überschneiden sich die Fehlerellipsen im zweiten Quadranten, wo sich zuvor bereits der Versatz der Mittelwerte befunden hat. Auch hier ist eine Längsstreckung der Fehlerellipsen in Richtung der weiter entfernten Landmarken zu beobachten.

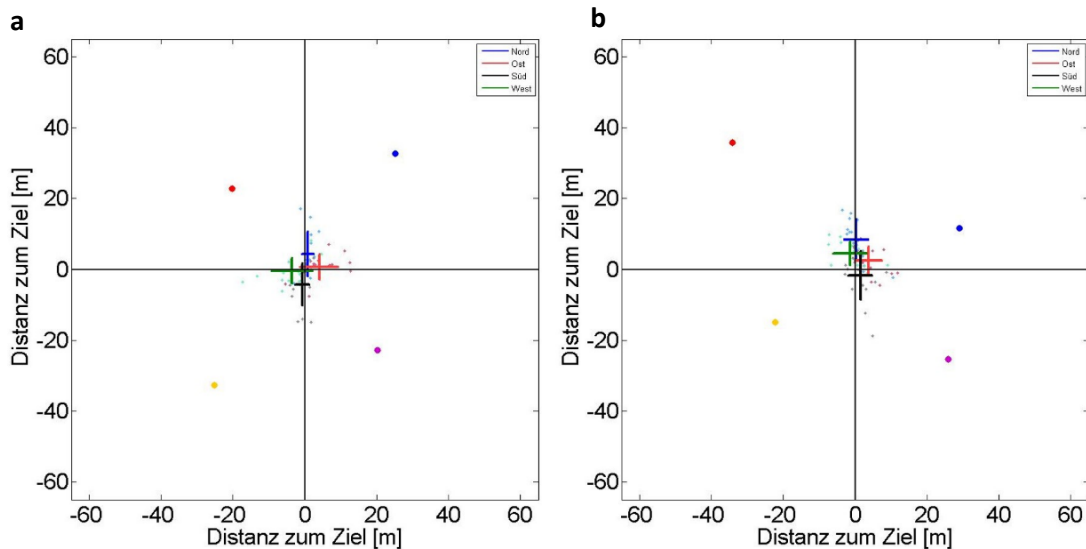


Abb. 13: Standardabweichungen und Mittelwerte der startpositionsabhängigen Entscheidungspunkte.

Für die jeweiligen Startpositionen wurden die mittleren Entscheidungspunkte sowie die entsprechende Standardabweichung in x- und y-Richtung aufgetragen. Die blauen Werte gehören zu Nord, die roten zu Ost, die schwarzen zu Süd und die grünen zu West.

a Die Werte der östlichen und westlichen Startrichtung streuten beim Parallelogramm eher in x-Richtung, während die aus nördlicher und südlicher Richtung eher in y-Richtung verteilt waren.

b Beim unregelmäßigen Viereck streuten die Werte, der Scherung des Vierecks folgend, vermehrt in y-Richtung.

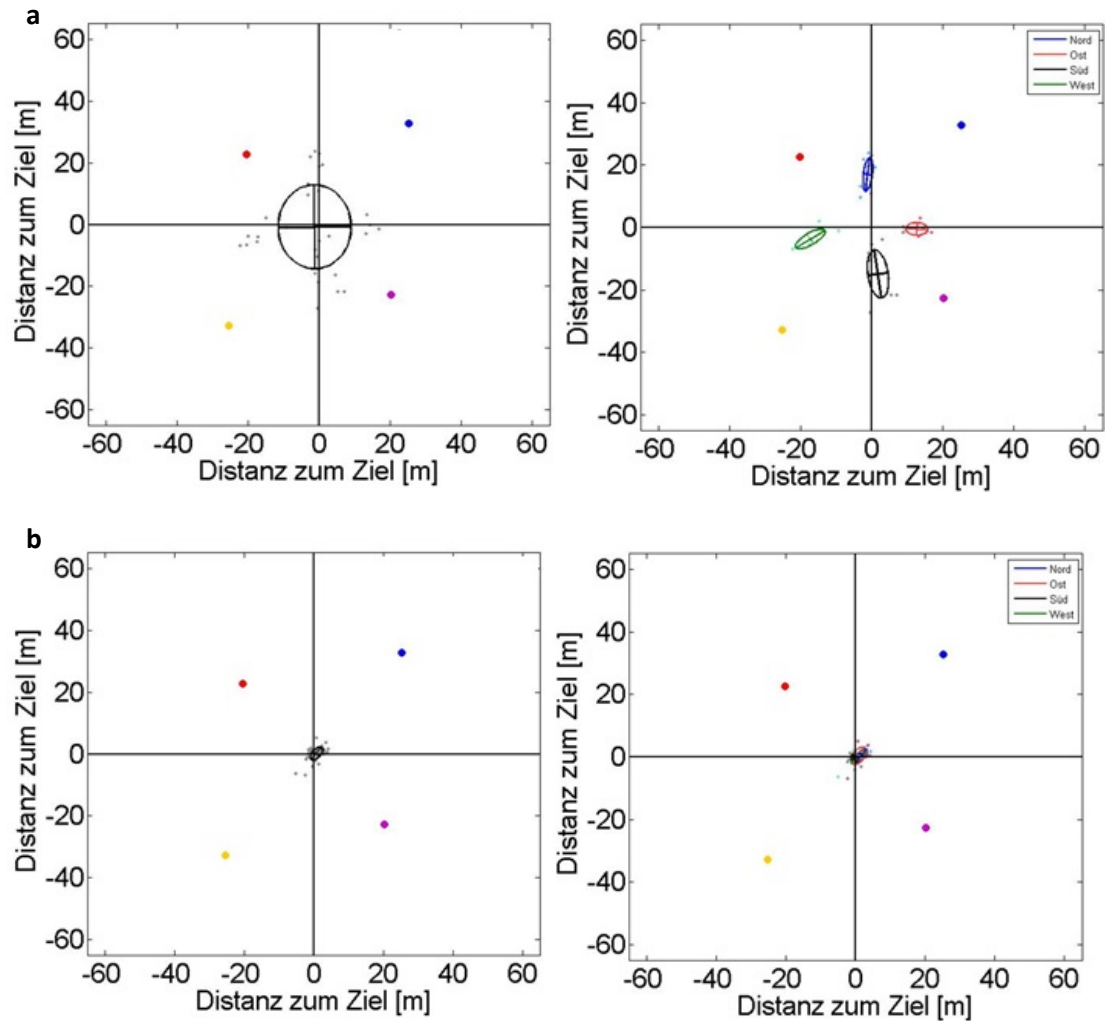


Abb. 14: Beispiele zweier Versuchspersonen für den Zusammenhang zwischen startpositionsabhängigen Fehlerellipsen und den Gesamtfehlerellipsen aus der Gruppe Parallelogramm.

Auf den linken Abbildungen sind jeweils grau die Entscheidungspunkte der entsprechenden Versuchsperson sowie in schwarz die Gesamtfehlerellipse eingezeichnet, während sich auf den rechten Abbildungen die startpositionsabhängigen Fehlerellipsen für die betreffenden Versuchspersonen befinden. Beide Versuchspersonen gehörten der Gruppe Parallelogramm an.

a Diese Versuchsperson zeigte eine schlechte Ortserkennungsleistung. Eine starke Streuung der Werte und Startpositionsabhängigkeit waren vorzufinden.

b Diese Versuchsperson zeigte eine besonders gute Ortserkennungsleistung. Die Streuung der Werte war sehr gering und keine Startpositionsabhängigkeit zu finden.

Betrachtet man die startabhängigen Fehlerellipsen einzelner Versuchspersonen, fällt auf, dass diese manchmal sehr weit auseinander oder aber übereinander gelagert waren. Vergleicht man diese Abbildung mit der Gesamtfehlerellipse der betreffenden Versuchsperson, ist eine große Gesamtfehlerellipse bei denjenigen zu erkennen, deren startpositionsabhängige Ellipsen weit auseinander liegen (Abb. 14).

Die Versuchsperson in Abb.14a zeigte eine sehr schlechte Ortserkennungsleistung, da ihre Entscheidungspunkte sehr weit und stark startpositionsabhängig streuten, während die Versuchsperson in Abb.14b über eine gute Ortserkennung zu verfügen schien, da ihre Werte geringfügig streuten, die Fehlerellipse sehr klein war und sie sich fast exakt auf dem eigentlichen Brückenkreuzungspunkt befand. Auffallend war, dass bei dieser Versuchsperson die startpositionsabhängigen Fehlerellipsen nicht unterschiedlich voneinander waren. Das bedeutet, dass es einen Zusammenhang zwischen den startpositionsabhängigen Unterschieden der Fehlerellipsen und einer schlechteren Performance bzw. einer größeren Gesamtfehlerellipse gab. Weiterhin zeigte ein Vergleich der entsprechenden Heatmaps beider Versuchspersonen, dass unterschiedliche Strategien verwendet wurden. Die Laufwege der Versuchsperson mit der schlechteren Performance wiesen darauf hin, dass diese unabhängig von der Startposition nur eine bestimmte Distanz abgelaufen ist, während die Laufwege der besseren Versuchsperson ausgehend von den verschiedenen Startpositionen zu einem deutlich abgegrenzten Suchbereich in der Nähe des Zielortes führten (Abb. 15).

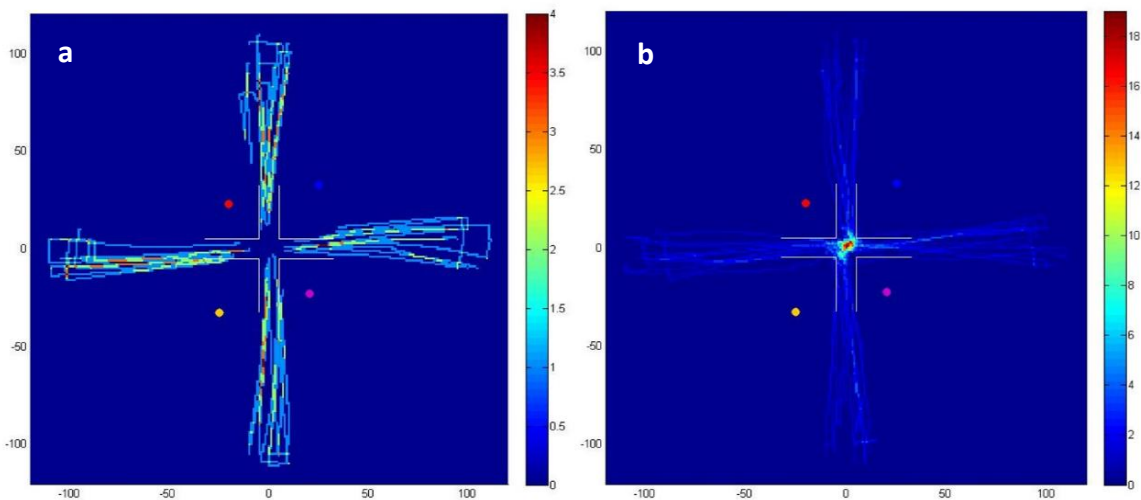


Abb. 15: Laufwege der Versuchspersonen mit der besten und schlechtesten Performance.

a Die Versuchsperson lief unabhängig von ihrer Startposition stets dieselbe Distanz ab, um zum Ziel zu gelangen. Deshalb konnte kein klar definierter Suchbereich festgestellt werden.

b Diese Versuchsperson nutzte die Landmarken zur Orientierung, was die am Brückenkreuzungspunkt zusammenlaufenden Trajektorien und somit einen klar definierten Suchbereich verursachte.

3.4 Distanzeinschätzung

Um eine Aussage über die Distanzeinschätzung der Versuchspersonen für die gegenüberliegenden Landmarken treffen zu können, wurden in Abb.16 die mittleren Distanzfehler der Versuchspersonen für die jeweiligen Landmarkenpaare, das wahre Verhältnis sowie das von den Personen wahrgenommene bzw. eingestellte Verhältnis gegeneinander aufgetragen.

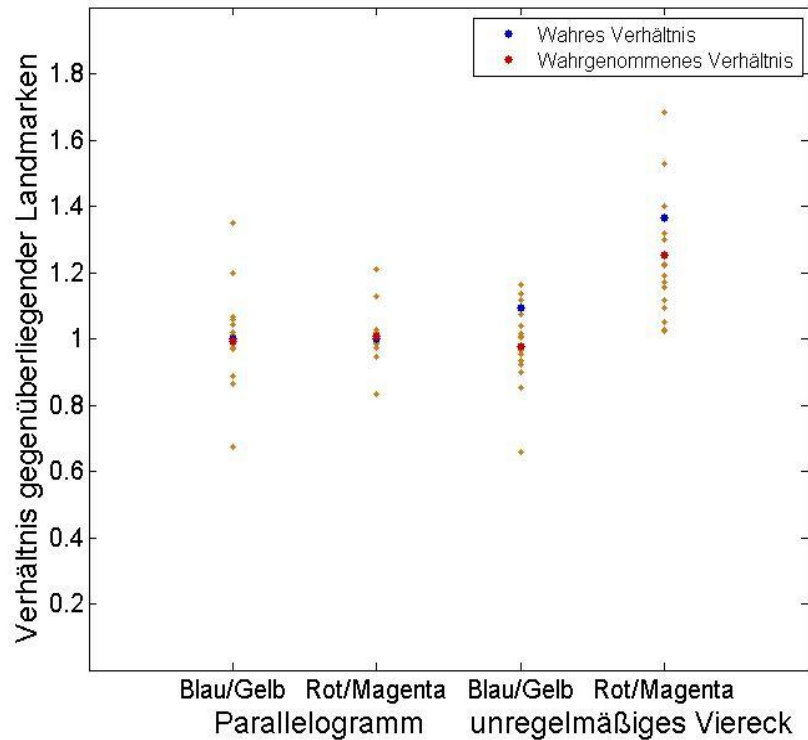


Abb. 16: Distanzverhältnisse gegenüberliegender Landmarken.

In Orange sind die mittleren Distanzfehler der Versuchspersonen eingezeichnet. Der rote Punkt zeigt das wahrgenommene bzw. eingestellte Verhältnis der gegenüberliegenden Landmarken, während der blaue Punkt das wahre Verhältnis dieser angibt. Die Gruppe unregelmäßiges Viereck konnte die Verhältnisse der gegenüberliegenden Landmarken schlechter einschätzen als die Gruppe Parallelogramm.

Beim Parallelogramm befanden sich die gegenüberliegenden Landmarken in einem Verhältnis von 1:1 zueinander. Sowohl für die blaue und gelbe als auch für die rote und magentafarbene Landmarke lag das eingestellte nahe dem wahren Verhältnis, sie waren nicht signifikant unterschiedlich (abhängiger t-Test; blau/gelb Parallelogramm: $p=0,9434$; rot/magenta Parallelogramm: $p=0,6324$). Beim unregelmäßigen Viereck befanden sich die gegenüberliegenden Landmarken in unterschiedlichen Verhältnissen zueinander. Die Distanzunterschiede zwischen Blau und Gelb (4,5028 m) waren sehr gering, während diese zwischen Rot und Magenta sehr groß waren (13,191 m). In dieser Gruppe stellten die

Versuchspersonen die blaue und gelbe Landmarke als gleich groß ein. Es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen dem eingestellten Verhältnis und einem 1:1 Verhältnis für diese Landmarken (abhängiger t-Test: $p=0,5832$). Daher kam es zu einem signifikanten Unterschied zwischen dem wahren Verhältnis und dem eingestellten Verhältnis der blauen und gelben Landmarke beim unregelmäßigen Viereck (t-Test: $p=0,0026$). Bei großen Distanzunterschieden, wie bei den Landmarken Rot und Magenta, wurde das Verhältnis nicht signifikant unterschiedlich eingestellt, jedoch gab es eine Tendenz, dass das Verhältnis unterschätzt wurde ($p=0,1899$).

3.5 Geschlechter-Effekt

Der Geschlechtereffekt wurde anhand der Performance der Geschlechter beider Versuchsgruppen untersucht. Als Maß für diese dienten die summierten Längen der Hauptachsen der Fehlerellipsen, welche für die weiblichen und männlichen Versuchspersonen gemittelt und für beide Gruppen in Abb.17 aufgetragen wurden. Die Standardabweichung der Männer betrug beim Parallelogramm $STD=(8,9170)$, bei den Frauen $STD=(14,1419)$. Beim unregelmäßigen Viereck waren die Standardabweichung der Frauen sowie der Männer geringer (Frauen $STD=(9,2827)$; Männer $STD=4,7884$). Beim Parallelogramm konnte kein signifikanter Unterschied zwischen männlichen und weiblichen Versuchspersonen festgestellt werden, während beim unregelmäßigen Viereck ein signifikanter Unterschied der Performance zwischen den Geschlechtern vorhanden war (Parallelogramm: $p=0,3089$; unregelmäßiges Viereck: $p=0,0437$).

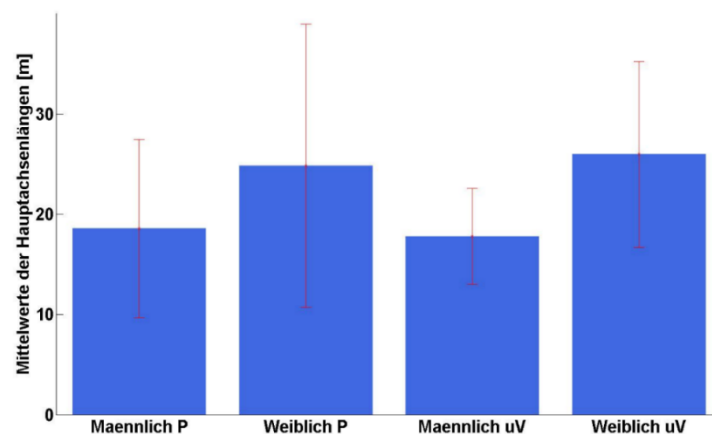


Abb. 17: Geschlechtereffekt.

Als Maß für die Performance der Versuchsperson wurden die die Längen beider Hauptachsen der Fehlerellipse verwendet. Diese wurden pro Versuchsperson summiert und gemittelt. Je größer der Wert, desto schlechter die Performance. Die dem Parallelogramm zugehörigen Daten wurden als „P“, die des unregelmäßigen Vierecks als „uV“ bezeichnet. In Rot wurde die Standardabweichung aufgetragen. Die weiblichen Versuchspersonen waren bei beiden Gruppen schlechter als die männlichen, jedoch nur in der Gruppe unregelmäßiges Viereck signifikant schlechter.

3.6 Beste Versuchspersonen

Da die Streuungen der Werte mancher Versuchspersonen wesentlich größer waren als die anderer, wurden für beide Gruppen die jeweils besten 50% der Teilnehmer ermittelt. Als besonders gut galten Personen mit einem geringen Wert der gemittelten und summierten Hauptachsenlängen ihrer Fehlerellipse, als besonders schlecht diejenigen, mit einem hohen. In Abb.18 ist erkennbar, dass die Streuung der Werte sowie die Fehlerellipsen für beide Gruppen nun kleiner waren als die aller Versuchspersonen in Abb.8. Die Entscheidungspunkte der acht besten Versuchspersonen unterschieden sich in beiden Gruppen signifikant ($T^2(8)=16,3491$, p-Wert=0,0269). Weiterhin unterschieden sich die Entscheidungspunkte beim Parallelogramm ebenso wie bei der statistischen Analyse aller 16 Versuchspersonen nicht vom eigentlichen Brückenkreuzungspunkt ($T^2(8)=0,7545$, p-Wert=0,7356), während sich beim unregelmäßigen Viereck gleichermaßen ein signifikanter Versatz vom Ursprung feststellen ließ ($T^2(8)=37,6211$, p-Wert=0,0039). Wurden die besten 50% auf die Startpositionsabhängigkeit getestet, fand man im Falle des Parallelogramms erneut eine Übereinstimmung der Ergebnisse mit denen aller Versuchspersonen (Abb. 19). Jedoch zeigten die startpositionsabhängigen Fehlerellipsen der besten Acht in beiden Versuchsgruppen eine deutlichere Ausrichtung zu den weit entfernten Landmarken. Zudem ähnelten sie im Vergleich zu denen aller Versuchspersonen in ihrer Richtung eher der Gesamtfehlerellipse. Auch Sowohl die Entscheidungspunkte von Nord/Süd als auch die von Ost/West waren signifikant unterschiedlich zueinander (Nord/Süd Parallelogramm: $T^2(8)=16,1237$, p-Wert=0,0277). Allerdings war bei den besten acht Versuchspersonen beim unregelmäßigen Viereck nur ein signifikanter Unterschied der Werte von Nord/Süd, jedoch nicht von Ost/West zu finden (Nord/Süd unregelmäßiges Viereck: $T^2(8)=16,5571$, p-Wert=0,0262; Ost/West unregelmäßiges Viereck: $T^2(8)=6,5861$, p-Wert=0,1368). Mit Hilfe eines ungepaarten T-Tests wurde die Performance der acht Besten wieder anhand der gemittelten und summierten Hauptachsenlängen gegen alle 16 Versuchspersonen getestet. In der Gruppe Parallelogramm wiesen die besten Teilnehmer eine signifikant geringere Performance bzw. Streuung der Entscheidungspunkte auf (p-Wert=0,0455). Lediglich beim unregelmäßigen Viereck war keine signifikante Verbesserung der Entscheidungspunkte nachweisbar (p-Wert=0,0767).

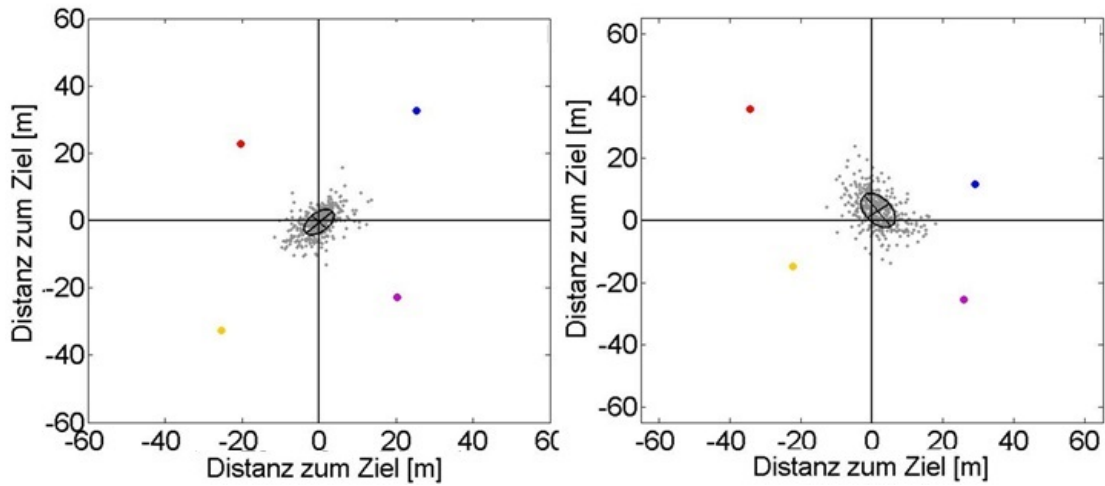


Abb. 18: Entscheidungspunkte und Fehlerellipse der besten 50% der Versuchspersonen.
 Im Gegensatz zu der Fehlerellipse aller Versuchspersonen (Abb. 8), sind die der besten 50% kleiner, die Entscheidungspunkte streuten weniger. Die Orientierung der Verteilung der Entscheidungspunkte in Richtung der weiter entfernten Landmarken ist ebenso vorhanden wie in Abb. 8.

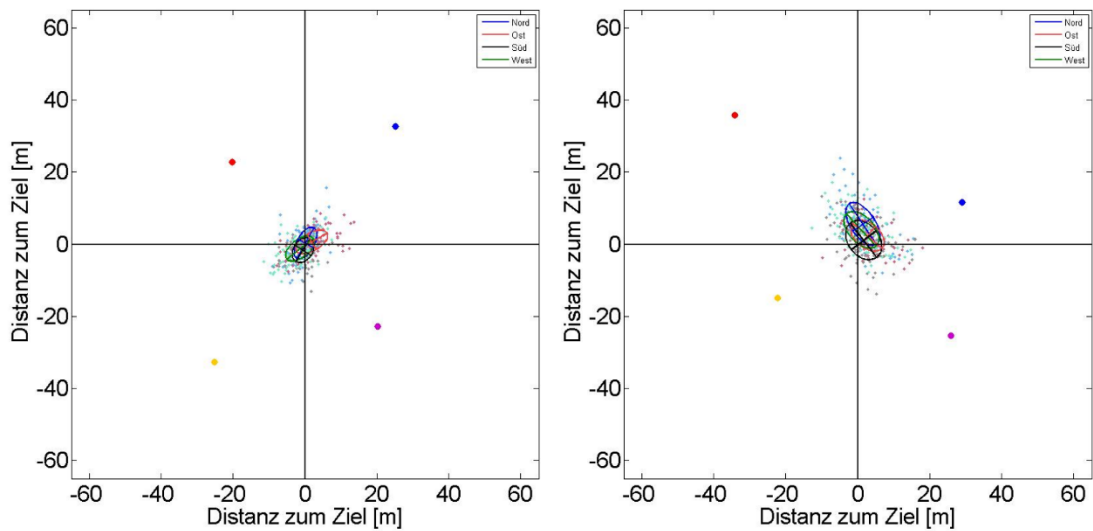


Abb.19: Startpositionsabhängige Fehlerellipsen der besten 50% der Versuchspersonen.
 Sowohl die Streuung der Entscheidungspunkte als auch die Größe der Fehlerellipsen ist für die 8 besten Versuchspersonen kleiner als bei allen Versuchspersonen (Abb.8). Trotzdem konnte ein Startrichtungseffekt nachgewiesen werden.

4 Diskussion

In dieser Arbeit sollte, aufgrund des häufig beobachteten Vorkommens von systematischen Fehlern bei Ortserkennungsaufgaben und Distanzschätzungen der vorangegangenen Studien (Gross, 2013; Dorer, 2013) geklärt werden, ob die geometrische Anordnung von Landmarken bei inzidentellem Lernen einen Einfluss auf die Ortserkennung in einer virtuellen Umgebung hat. Weiterhin stellte sich die Frage, ob dieser Fehler von den relativen Distanzen zwischen Landmarken und Zielort abhängig sein könnte. Es stellte sich heraus, dass der systematische Fehler sowie die Streuung tatsächlich auf die Orientierung an den Distanzen zwischen Landmarken und Ziel zurückzuführen ist und sich die Versuchspersonen nicht an den geometrischen Verhältnissen der Landmarkenkonfiguration orientiert haben.

Wie bereits zuvor beschrieben, würden sich bei einer primären Orientierung an der Geometrie der Landmarkenkonfiguration die Entscheidungspunkte in beiden Versuchsgruppen um geometrisch wichtige Punkte, nämlich Diagonalschnittpunkt oder Flächenschwerpunkt, sammeln, wohingegen bei einer Orientierung an den relativen Distanzen zu den Landmarken beim unregelmäßigen Viereck ein Versatz vom Brückenkreuzungspunkt in Richtung der weiter entfernten Landmarken vorzufinden wäre. Die Ergebnisse zeigten, dass der mittlere Entscheidungspunkt unterschiedlich von den geometrisch wichtigen Punkten war. Vor allem aber war er vom Ziel in Richtung der fernen Landmarken versetzt. Dies spricht also für eine Orientierung anhand relativer Distanzen zwischen Ziel und Landmarken und deckt sich demnach mit den Beobachtungen Wallers et al. (2002), die bei ihren Studien ebenfalls die Wichtigkeit relativer Distanzen bei Orientierungsexperimenten postulierten. Auch Spetch et al. (1997) betonten die kritische Rolle von Distanzen für das Ortslernen beim Menschen. Sie ließen Tauben und Menschen ein Ziel wieder finden, welches sich relativ zu einer Landmarkenkonfiguration befand. Dabei entdeckten sie, dass beide sowohl Distanz- als auch Richtungsinformationen verwendeten, diese jedoch auf unterschiedliche Art und Weise. So abstrahierten Menschen die metrischen Informationen, wohingegen die Tauben bevorzugt Richtungsinformationen nutzten. Somit stellten die Autoren fest, dass Menschen eher auf relative Distanzen zwischen Landmarken sowie deren Konfiguration vertrauten als auf absolute Distanzen und begründeten dieses Verhalten unter anderem mit der Erfahrung des Gebrauchs von Karten zur Orientierung und Ortsfindung, bei welchem die Relationen von Orten

zueinander eingehalten und relative Distanzen in verschiedene Größenordnungen transformiert, jedoch keine absoluten Distanzen verwendet werden müssen.

Die von Philbeck und Loomis (1997), für Distanzen ab etwa 3 m, sowie Gilinsky (1951) beobachtete Unterschätzung von Distanzen, ist auch in unserem Experiment von Bedeutung und ist eine mögliche Erklärung für die Streckung der Verteilung aller Entscheidungspunkte in Richtung der weiter entfernten Landmarken (Abb.8). Dies lässt sich auch bei vielen psychophysikalischen Wahrnehmungsexperimenten vorfinden, deren Ergebnisse mit dem Weber-Fechner-Gesetz in Einklang gebracht werden konnten (Fröhlich, 2010). Mit ansteigender Distanz kommt es zu immer größer werdenden Unsicherheiten bei deren Einschätzung. Damit einhergehend kommt es wiederum zu einer größeren Streuung der Daten und somit zu einer Streckung der Verteilung. Außerdem zeigte eine Analyse der Hauptachsen, dass sich die Verteilung in Richtung der weiter entfernten Landmarken erstreckt und sich letztlich die Form der Fehlerellipse den metrischen Gegebenheiten der Konfiguration anpasste (Abb.8). Eine mögliche Erklärung wäre eine bevorzugte Orientierung lediglich anhand dieser Landmarken. So wurde eine Präferenz zur Orientierung an den weiter entfernten von mehreren möglichen Landmarken im Blickfeld von Zugaro et al. (2004) beobachtet. Sie demonstrierten in Versuchen mit Ratten, dass diese sich bei gleichzeitiger Anwesenheit zweier Landmarken aus demselben Blickwinkel für die weiter entfernt lokalisierte entschieden. Ähnliche Befunde lieferten auch Gallistel et al. (1990), die bei Ortserkennungsexperimenten mit Kiefernähern das Abspeichern und Nutzen der vom Ziel aus weiter entfernten Landmarken beobachteten. Dass die Anwendung einer solchen Strategie durchaus Sinn macht, ist mit Aussagen Franz et al. (1998) erklärbar, in deren Arbeit zum Schnappschussmodell deutlich wird, dass weiter entfernte Landmarken zu kleineren Differenzen zwischen dem retinalen Bild und dem Schnappschuss führen als nähere Landmarken, welche größere Bewegungsvektoren und dementsprechend größere Veränderungen erzeugen. Eine bevorzugte Orientierung mit Hilfe der weiter entfernten Landmarken konnte allerdings aus unseren Ergebnissen nicht geschlossen werden. Im Experiment von Gross (2013), welches denselben Versuchsaufbau hatte, wurde eine solche Strategie mit Hilfe einer Blickrichtungsanalyse ausgeschlossen. Sie zeigte, dass alle Landmarken im Mittel gleich häufig angeschaut wurden, also alle Landmarken in die Ortserkennung einbezogen wurden. Dass diese Präferenz bei uns ebenso nicht vorhanden war, liegt vermutlich daran, dass sobald man sich inmitten der Landmarkenkonfiguration befand, lediglich eine Landmarke im Blickfeld vorhanden war.

Deshalb folgern wir, dass die metrischen Informationen aller Landmarken bei der Ortserkennung miteinbezogen werden. Dies führte in unseren Experimenten dazu, dass sich die Fehlerellipsen der jeweiligen Konfiguration anpassten und diese wiederum anhand ihrer Form sowie deren Orientierung Rückschlüsse auf die geometrische Anordnung der Landmarken zuließen.

Um die Erkenntnisse über die fehlerhaften Distanzschätzungen unserer Versuchspersonen zu konkretisieren, wurden in Abb.16 die wahren Verhältnisse der jeweils gegenüberliegenden Landmarken, sowie die von den Personen eingestellten Verhältnisse gegeneinander aufgetragen. Hierbei kann eindeutig belegt werden, dass die Versuchspersonen Probleme hatten sowohl sehr kleine als auch größere Distanzverhältnisse einzuschätzen, jedoch bei übereinstimmenden Distanzverhältnissen in der Lage waren, eine akkurate Schätzung zu demonstrieren. Im Falle des unregelmäßigen Vierecks, bei dem die blaue und gelbe Landmarke lediglich einen geringen Distanzunterschied von 4,5 m zum Ziel aufwiesen, wurden die Distanzen als gleich eingeschätzt. Auch bei großen Distanzunterschieden zwischen Ziel sowie roter und magentafarbener Landmarke hatten die Versuchspersonen enorme Schwierigkeiten das Verhältnis beider Distanzen korrekt einzuschätzen. Das Verhältnis wurde zwar unterschätzt, jedoch nicht als gleich eingeschätzt. Entsprechend vermuten wir, dass Distanzunterschiede erst ab einer gewissen Schwelle feststellbar sind und erst beim Überschreiten dieser als unterschiedlich eingeschätzt werden. Im Gegensatz dazu stellte die Versuchsgruppe mit dem Parallelogramm, deren Distanzen zum Ziel stets gleich waren, diese im Mittel korrekt ein.

Um einen möglichen Startrichtungseffekt festzustellen, wurden die gesetzten Entscheidungspunkte sowie die entsprechend zugehörigen Fehlerellipsen abhängig von ihrer jeweiligen Startposition illustriert und die mittleren Entscheidungspunkte der jeweiligen Richtungspaare Nord/Süd und Ost/West gegeneinander getestet. Zudem konnte auf diese Weise analysiert werden, ob es grundsätzlich zu einer Unter- oder Überschätzung der zurückgelegten Distanzen zum Ziel kam. Es zeigte sich, dass in beiden Gruppen ein Startrichtungseffekt vorlag und die Versuchspersonen die Distanzen zum Ziel meist unterschätzten, folglich eine verkürzte Distanz zurücklegten, sodass ein deutlicher Unterschied der Entscheidungspunkte der gegenüberliegenden Himmelsrichtungs-paare zu verzeichnen war. Interessanterweise zeigten die startrichtungsabhängigen sowie die Gesamtfehlerellipsen einzelner Versuchspersonen einen eindeutigen Zusammenhang

zwischen der fehlerhaften Distanzeinschätzung des zurückgelegten Weges sowie deren Performance (Abb.14). Versuchspersonen mit einer kleinen Gesamtfehlerellipse, folglich einer guten Performance, wiesen überlappende startrichtungsabhängige Fehlerellipsen auf, wohingegen solche mit einer großen Gesamtfehlerellipse, also einer schlechten Performance, großräumig verstreute startrichtungsabhängige Fehlerellipsen offenbarten. Vergleicht man diese mit den Heatmaps der jeweiligen Versuchspersonen, bei denen die zurückgelegten Distanzen aus allen Richtungen in etwa gleich sind, findet man keinen eindeutig definierbaren Suchbereich. Bei Heatmaps von Versuchspersonen mit einem geringeren Startrichtungseffekt, findet man jedoch einen geclusterten, klar definierten Bereich, der mit dem der entsprechenden Gesamtfehlerellipse vergleichbar ist. Dies manifestiert unseren Verdacht, dass sich die Versuchspersonen mit schlechter Ortserkennung lediglich die zurückgelegten Distanzen gemerkt, sich jedoch nicht anhand der Landmarken orientiert und somit Wegintegration betrieben haben. Ein solches Verhalten würde auch die beobachtete große Streuung der Entscheidungspunkte schlechter Versuchspersonen verursachen und unsere Interpretation nicht anfechten.

Auffällig ist, dass bei Versuchspersonen, welche als Strategie ausschließlich die Wegintegration zu nutzen schienen, ebenfalls eine Unterschätzung vorlag. Eine Erklärung hierfür geben Petzschners und Glasauer (2011), die sich in ihren Experimenten mit systematisch auftretenden Fehlern während menschlicher Wegintegration beschäftigten und das sogenannte *model of Bayesian estimation* erstellten. Zunächst assoziierten sie die auftretenden Fehler mit Prozessfehlern in Orts- und Zeitintegration, konstatierten dann allerdings die Hypothese, dass die Fehler Ergebnis eines Systems seien, dessen Ziel die Optimierung seiner Performance durch Einbeziehen von Erfahrungswerten und zuvor erlangtem Wissen sei. Während der Bewegung in der Umgebung komme es gleichzeitig zur Fusion falscher Wahrnehmungsmessungen, zum Beispiel charakteristischen Unterschätzungen, mit zuvor gesammeltem Wissen und Erfahrungen. Dieses Modell ist nur bedingt mit unseren Überlegungen in Einklang zu bringen. Zunächst stützten sich die Befunde Petzschners und Glasauers auf Experimente zur Wegintegration, welche bei uns, mit Ausnahme sehr weniger Versuchspersonen mit schlechter Performance, nicht genutzt wird. Weiterhin erklärt dieses Modell wie auch die Studien zur Distanzwahrnehmung (Gilinsky, 1951; Philbeck & Loomis, 1997), aufgrund der höheren Varianz der Verteilung der Entscheidungspunkte, die Streckung dieser in Richtung der weiter entfernten Landmarken, jedoch nicht den systematischen Fehler. Die Einstellung der Distanz erfolgte

bei unserem Versuch für jede Distanz stets separat, da die Versuchspersonen immer nur eine Landmarke sehen konnten. Im Mittel sollten diese einzelnen Distanzeinschätzungen dazu führen, dass kein systematischer Versatz entsteht, sondern nur die Form und Richtung der Verteilung der Entscheidungspunkte beeinflusst wird.

Eine weitere Arbeit, die einen Denkanstoß zur Erklärung der systematisch auftretenden Fehler gibt, wurde von Loomis et al. (2013) verfasst. Sie beschäftigten sich unter anderem mit der Frage, ob das immerzu aktualisiert werdende *spatial image* durch das Speichern im Langzeitgedächtnis degradiert wird. Sie vermuteten, dass dieses beim Abspeichern der Informationen ins Gedächtnis verrauscht wird, widerlegten in ihren Versuchen jedoch den Einbau systematischer Fehler. Zudem muss man bedenken, dass unser Experiment in größeren räumlichen Dimensionen stattfand als es bei Loomis der Fall war und unsere Versuchspersonen den Zielort inzidentell lernten. Das bedeutet, dass unser *spatial image* aufgrund des größeren Distanzmaßstabs mehr verrauscht werden würde. Seine Experimente belegten jedoch eindeutig, dass beim Abspeichern der gesammelten Information die örtliche Präzision der erinnerten Ziele reduziert wurde. Die von Loomis et al. geschilderten Erkenntnisse konvergieren demnach mit unseren Überlegungen und bieten zwei mögliche Erklärungen für die beobachteten Ergebnisse. Wir gingen davon aus, dass der systematische Fehler beim Abrufen der transformierten Information aus dem Gedächtnis entsteht. Hierbei geht Information und somit auch die örtliche Präzision verloren. Dies deckt sich auch mit unseren Ergebnissen zu den Distanzverhältnissen. Eine mögliche Erklärung ist, dass das beim Abspeichern entstehende Rauschen über dem *spatial image* zur Folge hat, dass ähnlich große Distanzen als gleich weit entfernt enkodiert werden. Demnach könnten die Versuchspersonen die drei nah beieinander stehenden Landmarken (Blau, Magenta und Gelb) als gleich eingestellt haben. Zudem ist es vorstellbar, dass erst ab einer bestimmten Schwelle Distanzunterschiede trotz Rauschens diskriminiert werden, weswegen der Distanzunterschied der fernsten Landmarke zu den anderen Landmarken im unregelmäßigen Viereck durch die Versuchspersonen festgestellt wurde. Dadurch könnte ein Konflikt zwischen der weiter entfernten und der ihr gegenüberliegenden Landmarke entstehen, welche als gleich weit weg zu den übrigen (Blau, Gelb) enkodiert werden könnte. Dies könnte wiederum darin resultieren, dass sich ein Gleichgewicht zwischen der Anziehung zu der Position, an der die Entfernung zur weiter entfernten Landmarke übereinstimmt und der Anziehung zu der Position, an der die gegenüberliegende Landmarke als gleich weit entfernt zu den übrigen ist, einstellt. Diese

Theorie konnte nicht bestätigt werden, da wir erwartet hätten, dass die Gesamtfehlerellipse an dem Punkt liegt, an dem sich das zuvor beschriebene Gleichgewicht einstellt (Abb.20).

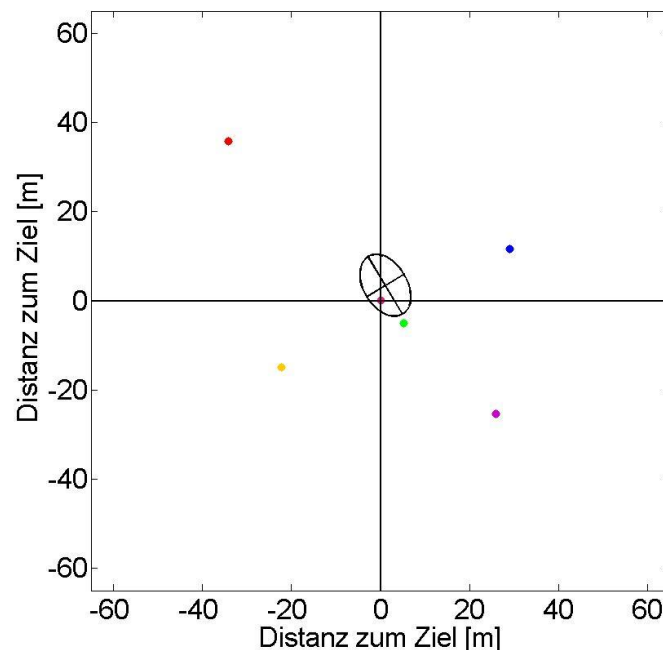


Abb.20: Theoretischer Entscheidungsbereich für die Annahme einer gleichen Wahrnehmungsschwelle bei nah beieinander lokalisierten Landmarken.

In grün wurde der Punkt eingezeichnet, an dem die nah beieinander liegenden Landmarken (Blau, Magenta, Gelb) gleich weit zueinander entfernt sind. Der pinke Punkt liegt auf der Geraden zwischen dem grünen und der fernen Landmarke (Rot) mit der Distanz, die diese zum Zielort hat. Die Fehlerellipse befindet sich nicht in dem Bereich zwischen den theoretischen Punkten.

Eine weitere mögliche Erklärung basiert auf der, durch das Rauschen verursachten, Auflösungsinderung des gespeicherten *spatial image*, durch die ein Unsicherheitsbereich der Wiedererkennung um die Landmarken herum entsteht. Da die schrittweisen Größenänderungen des retinalen Bildes der weiter entfernten Landmarken geringer sind als die naher (vgl. Franz et al., 1998), wird das Erreichen einer ausreichenden Übereinstimmung mit der abgespeicherten Repräsentation bei den nahen Landmarken früher registriert. Dadurch könnten die Versuchspersonen mehr von den fernen als von den nahen Landmarken angezogen werden und den systematischen Versatz in deren Richtung erklären. Beim Parallelogramm waren alle Distanzen zu den Landmarken gleich groß. Folglich hatte das Rauschen keinen bedeutenden Einfluss und führte dazu, dass die Versuchspersonen im Mittel den Zielpunkt ohne Versatz erreichten. Nach Analyse und Vergleich der vorliegenden Ergebnisse mit denen Gross und Dorers (beide 2013), schlussfolgern wir, dass der auftretende Versatz sowohl distanzabhängig sowie systematisch ist.

Ein weiterer herausstechender, aber in der Interpretation der Ergebnisse nicht wesentlicher, Punkt ist der vorhandene Geschlechtereffekt bei der Anordnung der Landmarken in Form des unregelmäßigen Vierecks. Bei dieser Konfiguration konnte eine signifikant bessere Performance männlicher Versuchspersonen festgestellt werden. Allerdings war dieser Effekt nicht besonders stark ($p = 0,0437$). Eine Begutachtung des Effektes im Kontext einer Arbeit Sandstroms et al. (1998) gibt einen Hinweis auf die zur Orientierung genutzten Informationen. Die Autoren, die eine Verbindung zwischen Geschlecht und Nutzung distaler Informationen bei Navigationsexperimenten in virtuellen Umgebungen untersuchten, berichteten von einer Reihe ähnlicher Arbeiten, die alle unterschiedlich gute Leistungen weiblicher und männlicher Versuchspersonen in verschiedensten Navigationsexperimenten offenbarten. Allen Arbeiten gemein war die unterschiedliche Nutzung vorhandener Orientierungsinformationen beider Geschlechter. So vertrauten Frauen vorwiegend auf Landmarken, wohingegen Männer eher gewillt waren sowohl Landmarken als auch geometrische Informationen zur Orientierung zu nutzen. Mögliche Erklärungen für diesen Effekt sahen die Autoren im Einfluss von Hormonen. Sie vermuteten, dass die Performance weiblicher Versuchspersonen durch zyklische Hormonschwankungen beeinflusst werde, betonten allerdings auch, dass Experimente hierzu fehlten und das bisher erforschte Wissen diesbezüglich nicht ergiebig genug sei, um eine fundierte Aussage über die tatsächliche Stärke des Hormoneinflusses oder eine andere mögliche Ursache zu machen. Als weiterer möglicher Faktor wurde die unterschiedliche Erfahrung der Versuchspersonen mit den zur Navigation in der virtuellen Umgebung benötigten Utensilien wie beispielsweise Joysticks erwähnt. Im Gegensatz zu den männlichen Versuchspersonen hatten die weiblichen weniger bis keine Erfahrung mit der Nutzung dieser, was sich ebenso in den Ergebnissen eines Versuchs der Autoren zeigte. Sechs von acht weiblichen Versuchspersonen gaben bei der Frage zur Erfahrung mit Computerspielen eine niedrige Bewertung ab, während fünf der acht männlichen in dieser Versuchsgruppe eine hohe Erfahrung angaben. Warum bei der Versuchsgruppe mit der Landmarkenanordnung in Form des Parallelogramms kein Geschlechtereffekt vorhanden war, bleibt auch angesichts der Ergebnisse Sandstroms et al. fraglich. Die Feststellung, dass Männer im Gegensatz zu Frauen die geometrischen Gegebenheiten vermehrt nutzten, widerspricht unseren Beobachtungen, da unsere Ergebnisse die Nutzung der Geometrie ausschließen. Zusammenfassend könnten in unserem Experiment beide genannten Faktoren einen Einfluss gehabt haben. Dies lässt sich jedoch in Anbetracht der mangelhaften Datenmenge nicht verifizieren.

Setzt man unsere Ergebnisse mit dem Schnappschussmodell in Verbindung, scheint dieses nur bedingt anwendbar zu sein. Die für das Modell wichtigsten Informationen, nämlich Winkel- und Größen- bzw. Distanzunterschiede, waren in der virtuellen Umgebung in unterschiedlicher Qualität vorhanden. Befand sich die Versuchsperson beispielsweise an einer Startposition, konnte sie die gesamte Landmarkenkonfiguration betrachten und einen Einblick auf die vorhandenen Winkel erhalten. Hielt sie sich allerdings inmitten der Landmarkenkonfiguration auf, befand sich bloß eine Landmarke in ihrem Sichtfeld. Aus dieser Position heraus konnte ein Eindruck der Winkelverhältnisse zwischen den Landmarken lediglich durch Schwenken der Kamera mit Hilfe der Maus gewonnen werden. Die dadurch erhaltene Richtungsinformation war im Vergleich zur der, in einer realen Umgebung vorhandenen, von geringerer Qualität. In dieser steht ihnen propriozeptorische Information, in diesem Fall die Information der Körperlage, zur Verfügung. Laut Cartwright und Collet (1983) übte die räumliche Beziehung mehrerer Landmarken zueinander einen größeren Einfluss auf die Ortserkennung aus als die Größe der einzelnen Landmarken. Verwendeten und manipulierten Cartwright und Collet (1983) jedoch nur eine einzige Landmarke, suchten die Versuchstiere an dem Ort, an dem das retinale Bild mit dem in der Lernphase abgespeicherten Bild, dem Schnappschuss, übereinstimmte. In diesem Fall wurde die Landmarkengröße zum entscheidenden Faktor. Aufgrund des beschränkten Sichtfelds unserer Versuchspersonen, kann man letzere Beobachtung Cartwright und Collets mit unseren Ergebnissen vergleichen, wenn man die Schnappschusstheorie auf das Sichtfeld des Menschen reduziert. Cartwright und Collets Modell basiert jedoch auf einem panoramischen Schnappschuss, bei dem die Richtungsinformation der Landmarken bevorzugt wird, während in unserem Experiment diese nur eine untergeordnete Rolle spielte. Honigbienen verfügen über ein Sichtfeld von 280° (Stürzl et al., 2010) und somit über ein panoramisches Sichtfeld. Der Mensch müsste hingegen aufgrund seines beschränkten Sichtfeldes einen panoramischen Schnappschuss über einzelne, im Gedächtnis gespeicherte, Schnappschüsse zusammensetzen und zusätzliche Richtungsinformationen in diesen zu integrieren. Unsere Ergebnisse zeigen, dass ein auf unser Sichtfeld begrenzter Schnappschuss durchaus möglich ist, unterstützen die Idee eines panoramischen Schnappschusses allerdings nicht. Dies machen wir daran fest, dass die Form, Orientierung und Position der Verteilung der Entscheidungspunkte hauptsächlich auf der, qualitativ unterschiedlich vorhandenen, Distanz- und nicht auf der Richtungsinformation zu Landmarken beruhen.

Entgegen den Ergebnissen Cartwright und Collets (1983) zeigte unser Versuch sogar, dass wenn Winkelinformationen in ausreichendem Maße vorhanden sind, diese nicht zwingend als primäre Informationsquelle genutzt werden müssen. Die Versuchspersonen orientierten sich eindeutig mit Hilfe der Landmarkengrößen, um die relativen Distanzen zwischen Ziel und Landmarken zu bestimmen und den Brückenkreuzungspunkt zu ermitteln. Dies liegt unter anderem daran, dass neben den prägnanten Ergebnissen, der Versuchsaufbau auf eine Art und Weise konstruiert wurde, durch die nur die wichtigsten Informationsquellen in basaler Form vorhanden waren und somit eindeutige sowie plausible Zusammenhänge zu Ergebnissen und Literatur erkannt werden konnten. Vergleicht man beispielsweise unsere Landmarken mit denen Cartwright und Collets (1983), waren unsere in ihrer Struktur und Form homogen, wurden also gleichwertig behandelt, während die Zylinder in den Honigbienenexperimenten horizontale und vertikale Komponenten aufwiesen und die Autoren bewiesen, dass diese die Performance ihrer Versuchstiere beeinflussten. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass ihre Landmarken auf dem Boden positioniert waren, denn der von Ooi und He (2007) postulierte Einfluss von Winkeln zwischen Augenhöhe und Objekten als Informationsquelle zur Bestimmung der Distanz zu Objekten, wurde bei unserem Experiment vermieden, indem wir unsere Landmarken auf Augenhöhe der Versuchspersonen justierten. Unsere Distanzinformation wurde durch diesen Sachverhalt um eine weitere Informationsquelle beschränkt, was wiederum unsere Schlussfolgerung weiter bestärkt, da trotz verminderter Distanzinformation diese hauptsächlich genutzt wurde. Weiterhin nutzten wir im Gegensatz zu Cheng (1986) ausschließlich Distanzinformationen zu Objekten und schlossen so den Einfluss anderer Informationsquellen, zum Beispiel Raumbegrenzungen oder ferner Objekte im Hintergrund, aus, die eine Ortserkennung hätten verbessern, aber das Finden eines Zusammenhangs zwischen Ortserkennung und Geometrie sowie Distanzen der Landmarken verhindert hätte. Zudem wurden die von uns gebotenen geometrischen Informationen so gewählt, dass ein von Waller et al. (2002) bekundeter Einfluss der Orthogonalität, welche insofern sie vom Ziel aus gesehen zu den Landmarken vorhanden sei, die Performance der Versuchspersonen verbessern könnte, ausgeschlossen war.

Zusammenfassend ist die Bedeutung relativer Distanzen für die Ortserkennung hervorzuheben. Dass diese als Hauptinformationsquelle zum Auffinden des Ziels dienen, ist unseren Ergebnissen nach unbestreitbar und wird gemeinsam mit den Erkenntnissen von Spetch et al. (1997) sowie Waller et al. (2002) konsolidiert. Zunächst zeigen unsere

Ergebnisse deutlich, dass die Form und Orientierung der Verteilung der Entscheidungspunkte durch die Distanzinformation bestimmt wird. Weiterhin postulieren wir, dass der bei der Zielsuche entstehende systematische Fehler durch das beim Abspeichern induzierte Rauschen im *spatial image* verursacht wird.

Letztendlich bieten unsere Ergebnisse ein solides Fundament für weitere Experimente zur Ortserkennung. Anhand weiterer Landmarkenkonfigurationen könnte getestet werden, ab welchem Schwellenwert Distanzinformationen, die durch das Abspeichern des *spatial image* verrauscht werden, nicht mehr unterscheidbar sind. Zudem könnte man das Verrauschen des *spatial image* modellieren, um die distanzabhängige Gewichtung und damit die Lokalisation des systematischen Versatzes voraussagen zu können. Es bietet sich außerdem eine Erweiterung des Sichtfeldes der Versuchspersonen auf das von Insekten an, damit diese vom Ziel aus mehrere Landmarken gleichzeitig betrachten und so die Winkelinformation zwischen diesen vermehrt nutzen können. Dieselbe virtuelle Umgebung könnte in einem HMD-Experiment getestet werden, bei dem sich durch die zusätzliche Verfügbarkeit propriozeptorischer Reize die räumliche Repräsentation, also die Richtungsinformation zwischen Landmarken und die Position dieser im Raum, verbessern könnte. Weiterhin könnte der Zusammenhang der Wegintegration zur Ortsfindung untersucht werden. Um den Geschlechtereffekt besser analysieren zu können, könnte der Fragebogen weiter ausgebaut werden.

Literaturverzeichnis

- Biegler R., & Morris R. G. M. (1993). Landmark stability is a prerequisite for spatial but not discrimination learning. *Nature*, 632, 631-633.
- Cartwright B. A., & Collet T. S. (1983). Landmark learning in bees. *Journal of Comparative Physiology*, 151, 521-543.
- Cartwright B.A., & Collett T.S. (1987). Landmark maps for honeybees. *Biol Cybern* 57, 85-93.
- Cheng K. (1986). A purely geometric module in the rat's spatial representation. *Cognition*, 23, 149-178.
- Collett T.S., & Land M.F. (1975). Visual spatial memory in a hoverfly. *J Comp Physiol* 100, 59-84.
- Collett T.S., Cartwright B.A., & Smith B.A. (1986). Landmark learning and visuo-spatial memories in gerbils. *J Comp Physiol, A*, 158, 835-851.
- Collet T.S., Graham P. & Durier V. (2003). Route learning by insects, *Current opinion in Neurobiology*, 13, 718-725.
- Cornell, E., Heth, C., & Broda, L. (1989). Children's way finding: Response to instructions to use environmental landmarks. *Developmental Psychology*, 25(5), 755–764.
- Dorer M. (2013). Einfluss der Information von Winkelunterschieden und relative Distanzen zu Landmarken auf die Ortserkennung in einer virtuellen Realität. *Bachelorarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Tübingen*.
- Fraenkel G.S., & Gunn D.L., The orientation of animals, New York: Dover, 1961.
- Franz M., Schölkopf B., Mallot H. A., & Bühlhoff H.H. (1998). Where did I take that snapshot? Scene-based homing by image matching. *Biological Cybernetics*, 79, 191–202.
- Fröhlich W.D. (2010). Wörterbuch Psychologie. Deutscher Taschenbuch Verlag (1. Juni 2010), 193-194.
- Gallistel, C.R. (1990). The Organization of Learning. MIT Press: Cambridge.

- Gilinsky A. S. (1951). Perceived size and distance in visual space. *Psychological Review*, 58, 460-482.
- Gillner S., Weiß A. M., & Mallot H.A. (2008). Visual homing in the absence of feature-based landmark information. *Cognition*, 109, 105-122.
- Gross I. (2013). Unterschiedliche Ortserkennungsleistungen durch inzidentelles und explizites Lernen beim Menschen. *Bachelorarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Tübingen*.
- Janzen, G., & van Turenout, M. (2004). Selective neural representation of objects relevant for navigation. *Nature Neuroscience*, 7(4), 673–677.
- Kamil A. C., & Jones J. E. (1997). The seed-storing corvid Clark's nutcracker learns geometric relationships among landmarks. *Nature*, 390, 276-279.
- Loomis J. M., Klatzky R. L., & Giudice N. A. (2013). Representing 3D space in working memory: Spatial images from vision, hearing, touch, and language. *Multisensory Imagery*, 131-157.
- Mallot (2012), Kapitel Raumkognition in Karnah H.O., & Thier P., Kognitive Neurowissenschaften, 3. Auflage, Berlin: Springer.
- Menzel E.W. (1978), Cognitive mapping in chimpanzees, *Cognitive aspects of animal behavior*, 375-422.
- Morris R. G. M. (1981). Spatial localization does not require the presence of local cues. *Learning and motivation*. 12(2), 239-260.
- Münzer S., & Hölscher C. (2011). Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zu räumlichen Strategien. *Diagnostica*, 54(3), 111-125.
- O'Keefe J., & Nadel L. (1978). The hippocampus as a cognitive map. *Oxford University Press*.
- O'Keefe J., & Nadel L. (1979). Précis of O'Keefe & Nadel's the hippocampus as a cognitive map. *Behavioral and Brain Sciences*, 2, 487-494.
- Ooi T. L., & He Z. J. (2007). A Distance Judgement Function Based on Space Perception Mechanisms: Revisiting Gilinsky's (1951) Equation. *Psychological Review*, 114(2), 441-454.

- Petzschner F.H., & Glasauer S. (2011). Iterative bayesian estimation as an explanation for range and regression effects: a study on human path integration. *The Journal of Neuroscience*, 31(47), 17220 – 17229.
- Philbeck J.W. & Loomis J.M. (1997). Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology*, 23(1), 72 – 85.
- Sandstrom N.J., Kaufman J., & Huettel S.A. (1998). Males and females use different distal cues in a virtual environment navigation task, *Cognitive Brain Research* 6: 351–360.
- Siegel A. W., & White S. (1975). The development of spatial representations of large scale environments. In H. W. Reese (Ed.). *Advances in child development and behavior* (Vol. 10, pp. 10–55). New York: Academic Press.
- Spetch M.L., Cheng K., MacDonald S.E., Linkenhoker B.A, Kelly D.M. & Doerksen S.D. (1997). Use of Landmark Configuration in Pigeons and Humans: II. Generality across search tasks. *Journal of Comparative Psychology*, 111(1), 14-24.
- Stankiewicz B. J., & Kalia A. (2007). Acquisition and retention of structural versus object landmark knowledge when navigating through a large-scale space. *Journal of Experimental Psychology – Human Perception and Performance*, 33, 378-390.
- Stürzl W., Boeddeker N., Dittmar L., & Egelhaaf M. (2010). Mimicking honeybee eyes with a 280° field of view catadioptric imaging system. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5.
- Tinbergen N, & Kruyt W. (1938). Über die Orientierung des Bienenwolfes (*Philanthus triangulum* Fabr.). *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 25, 292-334.
- Tolman E. C. & Honzik C. H. (1930). “Ins.ight” in rats. *University of California Publications in Psychology*, 4, 215-232
- Waller D., Loomis J. M., Golledge R. G., & Beall A. C. (2002). Place learning in humans: The role of distance and direction information. *Spatial Cognition and Computation*, 2, 333–354.
- Wehner R, Michel B, Antonsen P (1996). Visual navigation in insects: coupling of egocentric and geocentric information. *J Exp Biol* , 199, 129-140.

- Zugaro M. B., Arleo A., Dejean C., Burguiere E., Khamassi M., & Wiener S. I. (2004). Rat anterodorsal thalamic head direction neurons depend upon dynamic visual signals to select anchoring landmark cues. *European Journal of Neuroscience*, 20, 530–536.

Anhang

1 Fragebogen

Fragebogen Experiment

Dieser Fragebogen enthält Aussagen zu Verhaltensweisen beim Zurechtfinden in räumlichen Umgebungen. Wir bitten Sie, für jede Aussage anzuzeigen, inwieweit Sie der Aussage zustimmen. Die Möglichkeit zur Ablehnung bzw. Zustimmung hat die folgende Form:

lehne stark ab 1 2 3 4 5 6 7 stimme stark zu

Bitte markieren Sie für jede Aussage diejenige Position durch Einkreisen, die dem Grad ihrer Zustimmung am besten entspricht. Markieren Sie bitte die Mittelposition (4), wenn Sie weder zustimmen noch ablehnen.

1 Während des Experiments war ich motiviert.	1	2	3	4	5	6	7
2 Das Experiment hat mir Spaß gemacht.	1	2	3	4	5	6	7
3 Ich würde wieder an einem psychophysikalischen Experiment teilnehmen.	1	2	3	4	5	6	7
4a In meiner Freizeit spiele ich häufig Computerspiele, die Orientierung und Bewegung im dreidimensionalen Raum erfordern.	1	2	3	4	5	6	7
4b Bei diesen Spielen schätze ich meine Orientierungsfähigkeit sehr gut ein.	1	2	3	4	5	6	7
5 Mein Orientierungssinn ist sehr gut.	1	2	3	4	5	6	7
6 Im Experiment habe ich versucht mir die räumlichen Gegebenheiten aus der Vogelperspektive vorzustellen.	1	2	3	4	5	6	7
7 Ich habe das Gefühl im Experiment gut abgeschnitten zu haben.	1	2	3	4	5	6	7
8 Während des Versuches war mir klar, welches Ziel ich verfolgen sollte.	1	2	3	4	5	6	7
9a Im Experiment hatte ich das Gefühl eine Veränderung bemerkt zu haben.						Nein	Ja

9b Wenn ja, welche Veränderung?

10 Während des Versuches habe ich mich orientiert an...

Name:

Alter:

Geschlecht: männlich weiblich

Studienfach:

Versuchsperson:

2 Probandeninformation und Einverständniserklärung

Probandeninformation zum Experiment

Name des Versuchsleiters: Stephan Lancier

Sie werden an einem psychophysikalischen Experiment teilnehmen. Während des Experimentes werden Sie in einer virtuellen Umgebung navigieren und Ihre Navigationsleistung wird dabei gemessen.

Ihre persönlichen, im Rahmen dieser Studie erhobenen Daten werden für wissenschaftliche Publikationen - in anonymisierter Form - verwendet und am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft gespeichert.

Die Teilnahme erfolgt freiwillig und kann zu jedem Zeitpunkt ohne Angabe von Gründen abgebrochen werden.

Tübingen, den _____

Unterschrift

Einverständniserklärung zur Teilnahme

Name der Versuchsperson (in Druckbuchstaben): _____

Ich erkläre mich bereit, an dem Experiment teilzunehmen.

Ich habe den Text der Probandeninformation und dieser Einverständniserklärung gelesen und verstanden. Aufgetretene Fragen wurden mir verständlich und vollständig beantwortet. Ich hatte ausreichend Zeit, Fragen zu stellen und mich für oder gegen eine Teilnahme zu entscheiden.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine persönlichen, während dieser Studie erhobenen, Daten im Rahmen von wissenschaftlichen Publikationen - in anonymisierter Form - veröffentlicht und am Lehrstuhl für Kognitive Neurowissenschaft gespeichert werden.

Tübingen, den _____

Unterschrift

