

EBERHARDT-KARLS-UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Fakultät für Biologie
Institut für kognitive Neurobiologie

Diplomarbeit

Aufbau von Routen- und Übersichtswissen beim Menschen in einer
virtuellen, unregelmäßig strukturierten Umgebung

Rebecca Hurlebaus

Tübingen, 31.Dezember 2007

Erstkorrektor: **Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot**

Zweitkorrektor: **Dr. Joachim Ostwald**

Betreuer: **Kai Basten**

Erklärung

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

Tübingen, den 31.12.2007

(Rebecca Hurlebaus)

Danksagung

Nachdem ich die letzten Monate meine ganze Umgebung verrückt gemacht habe, wird's jetzt Zeit, sich zu bedanken.

Erstmal bei der ganzen Gruppe des frisch umgetauften Institutes für kognitive Neurobiologie - für eine Arbeitsatmosphäre, in der man jeden jeder Zeit alles fragen kann und in der sich jeder Zeit nimmt, sei es für Diskussionen während der Planung der Versuche, Formatierungsfragen, Korrekturlesen oder was auch immer. Ein besonderer Dank geht hier natürlich an Kai Basten, dessen Geduld ich nur bewundern kann.

Dann muss ich mich bei meiner ganzen Familie bedanken. Vielen, vielen Dank für endloses Kindhüten, für die Geduld, die ihr mit mir und der doch etwas längeren Arbeit hattet und dafür, dass ihr einfach immer da seit, wenn man euch braucht.

Sonja und den Mini-Trittling sollte ich vielleicht noch extra erwähnen - die schaffen's immer wieder, mir klar zu machen, was wirklich wichtig ist.

Danke!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Navigation	9
1.2	Fragestellungen und Erwartungen	10
1.3	Virtuelle Umgebungen	13
2	Material und Methoden	14
2.1	Beschreibung der verwendeten virtuellen Umgebung	14
2.2	Ablauf der Versuche	15
2.3	Probanden	16
2.4	PTA-Test	16
2.5	Statistik	17
3	Training	19
3.1	Fragestellung und Durchführung	19
3.2	Ergebnisse	19
3.2.1	Fragebogen	19
3.2.2	Beschreibung der Trajektorien	20
3.2.3	Ähnlichkeit der letzten Pfade	21
3.2.4	Pfade pro Minute	24
3.2.5	Pfadlänge	25
3.2.6	Geradlinigkeit	26
3.2.7	Geschwindigkeit	27
3.2.8	Welche Streckenabschnitte etablieren sich wann?	33
3.2.9	Vergleich von Hin- und Rückweg	33
3.2.10	An was orientieren sich die Probanden? Auswertung der mündlichen Angaben.	35
3.2.11	Anmerkung zur Auswahl der statistischen Tests	39
3.3	Diskussion	40
4	Nebel	47
4.1	Fragestellung und Durchführung	47
4.2	Ergebnisse	47
4.3	Diskussion	52
5	Navigation ohne lokale Landmarken	55
5.1	Fragestellung und Durchführung	55
5.2	Ergebnisse	55
5.2.1	Trajektorien	55
5.2.2	Unterstützende Strategien	55
5.2.3	Fehler	58
5.3	Diskussion	58
6	Pointing	63
6.1	Fragestellung und Durchführung	63
6.2	Ergebnisse	64
6.2.1	Vorgehensweise der Probanden	64
6.2.2	Wie exakt deuten die Probanden bei sichtbarem Ziel?	64
6.2.3	Wie sind Pointingfehler verteilt?	65
6.2.4	Werden die Probanden mit zunehmendem Training besser?	68
6.2.5	Ändert sich der Fehler mit zunehmendem Abstand vom Ziel?	69
6.2.6	Spielt der Ort eine Rolle?	69
6.2.7	Spielt der Bekanntheitsgrad der Punkte, von denen aus gedeutet werden soll, eine Rolle?	69
6.2.8	Haben die globalen Landmarken einen Einfluss auf die Genauigkeit des Pointens?	71
6.2.9	Beeinflussen die Parameter sich gegenseitig?	72
6.2.10	Hat die Routenähnlichkeit einen Einfluss auf die Pointing-Genauigkeit?	73

6.2.11 Abschätzung des Winkelfehlers durch PTA-Test und Selbsteinschätzung des Orientierungssinnes	73
6.3 Diskussion	74
7 Homing - Pointen mit anschließendem Rückweg zum Nest	78
7.1 Fragestellung und Durchführung	78
7.2 Ergebnisse	78
7.2.1 Starttrichtung	78
7.2.2 Charakterisierung der Trajektorien zum Nest	78
7.3 Diskussion	80
8 Suche	81
8.1 Fragestellung und Durchführung	81
8.2 Ergebnisse	81
8.2.1 Erste Durchgänge	81
8.2.2 Suchstrategien	82
8.3 Diskussion	85
9 Gesamtdiskussion und Ausblick	86
Literaturverzeichnis	90
A Probandencodierung	94
B Fragen im Vorfeld	94
B.1 Einverständniserklärung	94
B.2 Fragebogen	95
C Probandeninformationen	96
C.1 Training	96
C.2 Pointen	96
C.3 Homing - Pointing mit anschließendem Heimfinden	97
C.4 Nebel	97
C.5 Navigation ohne Landmarken	98
D Zusätzliche Abbildungen	98
D.1 Korrelationen	98
D.2 Trajektorien	100
D.2.1 Trainingstrajektorien	100
D.2.2 Trajektorien im Nebel	109
D.2.3 Trajektorien ohne lokale Landmarken	110
D.2.4 Pointen und anschließende Navigation zurück zum Nest	114
D.2.5 Suche	120

1 Einleitung

1.1 Navigation

Alle Lebewesen, die zu gesteuerten Bewegungen fähig sind (also nicht nur passiv verdriftet werden), müssen in der Lage sein, diese Bewegung für sich vorteilhaft zu gestalten, zu navigieren, sei es beispielsweise für die Nahrungsaufnahme, zur Findung eines potenziellen Partners oder um sich vor schädlichen Umwelteinflüssen und Fressfeinden zu schützen. Dabei hat sich im Laufe der Evolution eine Reihe verschiedener Orientierungsmechanismen entwickelt (für eine Übersicht vergleiche beispielsweise Trullier u. a. 1997; Mallot Wintersemester 2004; Mallot und Franz 1999).

Bereits bei Bakterien sind Bewegungen, deren Richtung mittels *Taxis* bestimmt wird, zu finden (beispielweise Long und Hilpert 2007; Paola u. a. 2004). Dabei handelt es sich zweifelsfrei um eine Form der gerichteten Bewegung im Raum. Ob sie jedoch bereits als *Navigation* angesehen wird, hängt von der Definition des Begriffes ab. Nach Franz und Mallot (2000) etwa beinhaltet Navigation nur Mechanismen, die eine Erkennung des jeweiligen Zieles beinhalten, was bei reiner *Taxis* nicht zwingend der Fall ist, obwohl sie häufig Teil von Navigationsverhalten ist. Pflanzenwurzeln beispielsweise richten sich im Schwerfeld der Erde aus (*Gravitaxis*). Ein klar begrenztes Ziel ist hier nicht vorhanden. Männliche Copepoden der Art *Temora longicornis* folgen der Duftspur eines Weibchens (*Chemotaxis*, Weissburg u. a. 1998). Hier wird jede Bewegung des Männchens durch den Konzentrationsgradienten und die Zusammensetzung der Duftspur bestimmt. Das Ziel ist hierbei, anders als bei der Wurzelausrichtung, klar definiert: das Weibchen soll erreicht werden.

Auch bei *Guidance* muss nicht immer ein Ziel vorgegeben sein. Dieser Begriff beschreibt Verhaltensweisen wie das Verfolgen einer Pheromonspur (besonders bei Ameisen untersucht, vergleiche beispielsweise Breed u. a. 1987 oder Ehmer 1999) oder Wandfolgeverhalten (etwa bei Mäusen, vgl. Horev u. a. 2007), letztlich also auch die Nutzung einer asphaltierten Straße.

Eine klar auf ein Ziel (oder besser: einen Startpunkt) bezogene Orientierung stellt die *Wegintegration* dar. Sie wurde bisher bei unterschiedlichen Tieren untersucht, wie Insekten (hier wurden besonders Hymenopteren wie Ameisen oder Bienen untersucht, vgl. beispielsweise Collett und Collett 2000; Mueller und Wehner 1988), aber auch bei Vögeln (junge Brieftauben etwa greifen auf Wegintegration zurück - Wiltschko und Wiltschko 1999, ältere dagegen kaum - Wallraff u. a. 1980; Wallraff 1980) oder Säugern (beispielsweise beim Goldhamster in Etienne u. a. 1985, 1988) einschließlich des Menschen (beim Menschen in realen Umgebungen in Gramann u. a. 2005; Loomis u. a. 1993, in virtuellen Umgebungen in Kearns u. a. 2002; Peruch u. a. 1997). Die Wegintegration beschreibt die Aufrechterhaltung eines Vektors zum Ausgangspunkt der Trajektorie, der mit Hilfe von idiothetischen wie allothetischen Signalen bestimmt wird. Für die Speicherung des Vektors ist, anders als beispielsweise für *Taxis*, ein Arbeitsgedächtnis notwendig.

Viele Navigationsaufgaben setzen voraus, dass bestimmte Orte, gegebenenfalls auch nach einem längeren Zeitraum, wiedererkannt werden. Im einfachsten Fall wird das Ziel selbst als Orientierungsstütze genutzt (in diesem Fall spricht man von *Zielanfahrt*, ebenfalls eine Form von *Guidance*). Der Zielort kann aber auch über die Konstellation von Landmarken in seiner Umgebung erkannt und angesteuert werden (*Zielführung*). Ein solches Verhalten wurde beispielsweise wiederum bei Honigbienen (Fry und Wehner 2005 u. a.) beschrieben. Werden mehrere derartige Zielpunkte oder Landmarken linear miteinander verknüpft, spricht man von einer *Route*. Werden schließlich mit einem Ort mehrere Bewegungsoptionen assoziiert, deren Auswahl von der jeweiligen Intention des Navigators abhängt, spricht man von einem *Wegnetz* oder einer *kognitiven Karte*. Mit Hilfe von Mechanismen wie der Wegintegration oder dem visuellen Abschätzen von Distanzen zu entfernten Umgebungsmerkmalen (Gallistel und Cramer 1996) kann den einzelnen Verbindungen eine Metrik (Distanzen beziehungsweise Richtungsangaben zwischen Orten) zugeordnet werden.

Bei Menschen und zumindest bei Honigbienen ist schließlich auch ein kommunikativer Austausch von Umgebungswissen möglich. Honigbienen (Gattung *Apis*) vermitteln ihren Stockgenossinnen Informationen über eine neue, ergiebige Futterquelle durch einen Schwänzeltanz (Frisch 1965; Dyer 2002). Hierbei werden Richtung, Entfernung und Attraktivität der Futterquelle durch Ausrichtung, schwänzelnd zurückgelegter Strecke und Wiederholungsanzahl des Tanzes codiert. Die Richtung zur Futterquelle wird bei einigen Arten, beispielsweise der europäischen Honigbiene *Apis mellifera* durch gleichzeitiges Summen (auch während des sogenannten Rundtanzes) hervorgehoben. Als Bezug werden der Bienenstock, die Gravitation und die Position der Sonne genutzt.

Im Vergleich dazu ist die räumliche Kommunikation beim Menschen deutlich variabler. Sie basiert auf

Sprache und umfasst Wegbeschreibungen ebenso wie Wegmarkierungen (gemeint ist hier die Ausschilderung von Orten, die im Verlauf des betreffenden Weges zu erreichen sind, im Unterschied etwa zu Reviermarkierungen, die sich auf den markierten Ort selbst beziehen) und Landkarten.

1.2 Fragestellungen und Erwartungen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit menschlichem Navigationsverhalten. Besonders betrachtet wird dabei der Erwerb von räumlichem Wissen durch Explorationsverhalten in einer zu Beginn unbekanntem Umgebung, die Richtungsabhängigkeit des erworbenen Wissens sowie die Relevanz von lokalen und globalen Landmarken und bei gerichteten Suchen¹ eingesetzte Strategien.

Die Versuche wurden über einen PC mit 19"-Bildschirm in einer virtuellen Umgebung mit unregelmäßig verteilten Hindernissen durchgeführt. Den Anfang bildete eine Trainingsphase, in welcher die Probanden zwischen zwei festgelegten Zielpunkten hin und her navigieren sollten.

Neben dem Charakter der etablierten Routen (vgl. *Training*, Kapitel 3 und *Nebel*, Kapitel 4) sollte dabei untersucht werden, ob die Umgebung nur anhand der erlernten Routen repräsentiert wird, oder das Training zu einem Übersichtswissen über die Umgebung führt, welches auch abseits der Routen eingesetzt werden kann. Zu diesem Zweck wurde, noch vor Abschluss der Trainingsphase, mehrmals ein Pointingversuch (vgl. Kapitel 6) durchgeführt, bei welchem die Probanden von unterschiedlichen, auch unbekanntem, Punkten der Umgebung zu den Zielen deuten sollten. In einem weiteren Versuch (*Homing*, vgl. Kapitel 7) sollten die Probanden von derartigen Punkten zu einem der beiden Zielpunkte (dem Nest) zurück finden. Durch zwei weitere Teilversuche (vgl. *Nebel*, Kapitel 4 und *Navigation ohne lokale Landmarken*, Kapitel 5) sollte untersucht werden, ob die Umgebung anhand von lokalen Landmarken in Form von Hindernissen erlernt wurde, oder primär globale Anhaltspunkte genutzt wurden.

Die Entfernung eines Zielpunktes schließlich sollte dazu führen, dass die Probanden eine gerichtete Suche nach demselben durchführten. Die verwendeten Suchstrategien wurden analysiert (vgl. *Suche*, Kapitel 8).

Routenwissen und kognitive Karten Es existieren verschiedene Modelle dazu, wie genau der Erwerb räumlichen Wissens beim Menschen abläuft. Nach Siegel und White (1975) werden verschiedene Kategorien räumlichen Wissens in einer streng chronologischen Reihenfolge erworben. Diesem Modell zufolge wird zunächst Landmarkenwissen erworben. Diese Landmarken werden im nächsten Schritt zu Routen verbunden. Schließlich können die getrennten Routen zu einer kognitiven Karte vernetzt werden. Ein alternatives Modell wurde von Aginsky u. a. (1997) vorgeschlagen. Die dort vorgestellte Arbeit beschreibt ein Experiment, bei welchem die Probanden zunächst in einem Fahrsimulator eine Route lernten. Anschließend sollten sie eine Karte der virtuellen Umgebung skizzieren. Anhand dieser Karten teilten die Autoren die Probanden in drei Gruppen auf und stellten fest, dass beim Erwerb von räumlichem Wissen von Beginn des Trainings an eine von zwei Strategien verwendet worden waren. Die eine Strategie (als *visually dominated* bezeichnet) basierte auf der Wiedererkennung einzelner Plätze, die mit Bewegungsanweisungen assoziiert wurden und letztlich eine Route beschrieben, ohne dass dieses Wissen zu einer Repräsentation der Umgebung in Form einer Karte genutzt wurde. Bei der anderen Strategie (*spatially dominated*) bildeten die Probanden dagegen von Anfang an eine Übersicht, ohne zuvor eine Route erlernt zu haben. Wieder andere Arbeiten sprechen dafür, dass Routen- und Übersichtswissen zwar klar unterscheidbar sind (etwa über die betroffenen Hirnareale, vgl. beispielsweise Hartley u. a. 2003; Etchamendy und Bohbot 2007), jedoch parallel ablaufen. So fanden Hartley u. a. (2003), dass der rechte anteriore Hippocampus besonders bei der Bildung neuer Routen aufgrund eines bestehenden Übersichtswissens eine Rolle spielt, während beim Folgen bekannter Routen vorwiegend das Caput Nuclei Caudati aktiviert wird. Welche Repräsentation für eine Aufgabe genutzt wird, ist individuell unterschiedlich, was mit ein Grund für die unterschiedliche Leistung von Menschen bei Navigationsaufgaben zu sein scheint. Die bewusste Wahl einer Strategie wird auch beispielsweise von Gramann u. a. (2005) beschrieben. Sie fanden, dass Probanden, die sich für eine Orientierung in einem allozentrischen Bezugssystem "entschieden" hatten, dieselbe Aufgabe auch in einem egozentrischen Bezugssystem lösen konnten, ohne dass die Angaben dadurch fehlerhafter wurden.

¹ Gerichtete Suchen sind alle Suchen, bei denen bereits eine Erwartung über das Ziel besteht oder Vorwissen bezüglich der erwarteten Lage eine Rolle spielt.

Welche Informationen in einer kognitiven Karte "vermerkt" sind, ist unklar. Inwieweit beispielsweise die Metrik kognitiver Karten mit der euklidischen vergleichbar ist oder ähnlich verlässliche Informationen bietet, ist umstritten (vgl. beispielsweise Siegel und White 1975, Ishikawa und Montello 2006). Grid Cells des dorsocaudalen Medialen Entorhinalen Cortex (dMEC, Hafting u. a. 2005) bieten eine neuronale Möglichkeit, eine räumliche Metrik aufzubauen und zu erhalten. Sie zeigen ein umgebungsunabhängiges, schachbrettartig angeordnetes Aktivitätsmuster. Innerhalb des dMEC werden von dorsal nach ventral zunehmende Gitterabstände und jeweils innerhalb einer größeren Subpopulation von Zellen verschiedene Ausrichtungen codiert. Jeffery und Burgess (2006) beschreiben die Bildung einer kognitiven Karte über *Head Direction Cells*, *Grid Cells* und *Place Cells*. Dabei gelangen Informationen über Landmarken und Eigenbewegungen zu den Head Direction Cells.² Diese projizieren auf Grid Cells (Metrik) im Medialen Entorhinalen Cortex, von dort werden die Informationen an Place Cells (Ort) im Hippocampus weitergeleitet. Die Subpopulation von Place Cells, die gerade aktiv ist, könnte für die Umgebung codieren, in der das Tier sich gerade befindet. Die Erhaltung euklidischer Beziehungen (Abstand und Richtung) verschiedener Objekte in dem dargestellten Raum ist laut Sholl (1996) sogar Teil der Definition einer "kognitiven Karte".

Aufgrund einer solchen metrischen Karte sollten auch bisher unbekannt Verbindungen zwischen bekannten Landmarken abgeschätzt werden können. Foo u. a. (2005) überprüften eben diese Fähigkeit von menschlichen Probanden in einer immersiven virtuellen Umgebung. Dabei wurde Probanden beigebracht, zwei Schenkel eines Dreiecks (jeweils 8m lang) abzulaufen. Das Training wurde wiederholt, bis sie die Strecken mit einer Genauigkeit von 1m reproduzieren konnten. Im anschließenden Test wurden die Probanden unter Angabe des Startpunktes entlang eines Schenkels des Dreiecks geführt, und die Aufgabe bestand darin, den jeweils folgenden Schenkel abzulaufen. Ihren Ergebnissen zufolge greifen Menschen, wie Honigbienen, auf Landmarken zurück, falls solche vorhanden sind. In Gebieten ohne Landmarken ("Wüstenumgebung" im Experiment) muss jedoch auf zuvor erlangtes Übersichtswissen zurückgegriffen werden. In dieser Umgebung wurden sowohl Drehwinkel als auch Entfernungen stark unterschätzt, während bei vorhandenen Landmarken ("Wald") für die geschätzte Streckenlänge kein Unterschied zur Trainingssituation festgestellt werden konnte. Die Autoren (Foo u. a. 2005) interpretierten dies so, dass in diesem Experiment zwar ein grobes Übersichtswissen aufgebaut werden konnte, die Metrik jedoch bestenfalls sehr ungenau war. Dennoch mussten landmarkenunabhängige Informationen über Eigenbewegungen ständig mitverarbeitet worden sein. In einem Telexperiment wurden die gegebenen Landmarken verschoben, die Probanden folgten mit ihrer Route den Landmarken, allerdings nur bis zu dem Punkt, an dem die Veränderlichkeit der Landmarken und damit deren Unzuverlässigkeit auffiel. In diesem Fall griffen die Probanden wieder auf das parallel zur Verfügung stehende, grobere Übersichtswissen zurück. Wie ungenau dieses Übersichtswissen sein kann, wenn es auf der Einschätzung navigierter Strecken basiert, zeigt sich in vielen Experimenten zur menschlichen Wegintegration (vgl. beispielsweise Loomis u. a. 1993, Foo u. a. 2005), sowie darin, dass Menschen bei realen Bewegungen nicht einmal dazu in der Lage sind, geradeaus zu laufen (Kallie u. a. 2007, Uetake 1992, Dickstein u. a. 2005, Klatzky u. a. 1990), weswegen die eigene Position immer wieder durch externe Hinweise wie eindeutig identifizierbare Landmarken korrigiert werden muss (*Piloting*, Cornell und Heth 2003).

In dem in dieser Arbeit vorgestellten Experiment wurde das Übersichtswissen der Probanden ab dem zweiten Trainingstag wiederholt durch ein Pointingexperiment überprüft (vgl. Kapitel 6). Dabei sollten die Probanden von unterschiedlichen Orten der Umgebung aus zu den beiden Zielpunkten deuten. Da hierbei auch Positionen getestet wurden, welche die Probanden während der freien Exploration nicht betreten hatten, sollte eine korrekte Einschätzung der Richtungen nur aufgrund einer Übersicht über die Umgebung sowie die Position der Zielpunkte möglich sein. In einer Erweiterung des Pointingversuches sollten die Probanden schließlich nach Abschluss des Trainings zunächst wie gewohnt die Richtungen zu den beiden Zielpunkten angeben und dann zu einem der beiden Zielpunkte navigieren (vgl. Kapitel 7). Hierbei wäre bei gutem Übersichtswissen zu erwarten, dass die Probanden auf direktem Wege zu dem Zielpunkt navigieren, ohne beispielsweise Umwege über bekannte Punkte zu machen. Ein Einsparen auf die bekannte Trainingsroute dagegen spräche für eine gute Repräsentation der erlernten Route.

² Head Direction Cells feuern in Abhängigkeit der momentanen Ausrichtung des Tieres, weitergehende Informationen und Literaturangaben sind etwa in Hafting u. a. (2005) zu finden.

Richtungsabhängigkeit der Routen Von Ameisen ist bekannt, dass ihre Routen nicht richtungs-invariant gespeichert werden (vgl. beispielsweise Wehner u. a. 2002). So wurde bei *Melophorus bagoti* beobachtet, dass sie auf dem Weg zwischen einer Futterquelle und dem Nest in einer Umgebung variable Routen ausbildet, wobei sich die Wege zu einer Futterquelle von den Rückwegen zum Nest unterscheiden (Kohler und Wehner 2005). Die Umgebung rund um das betrachtete Ameisennest war ebenso strukturiert wie die hier verwendete virtuelle Umgebung.³

Auch Menschen scheinen derart gerichtete, also richtungsabhängige Repräsentationen auszubilden. Dafür spricht beispielsweise, dass Plätze als Ansichten "gespeichert" werden (Diwadkar und McNamara 1997). Eine solche Ansichts-Repräsentation würde erklären, warum Plätze zwar korrekt angelaufen, dann aber nicht erkannt werden. Golledge u. a. (1992) beispielsweise fanden, dass Kinder (9-12 Jahre alt) Bilder, die den Ansichten entlang eines zuvor gelaufenen Weges entsprachen, eher erkannten, als Bilder, die einzelne Merkmale deutlich, aber in ungewohnter Ausrichtung darstellten (beispielsweise ein Haus entlang der Strecke, das einmal seitlich in einer Aufnahme der Straße erscheint, ein anderes Mal frontal dargestellt ist).

Im Falle einer richtungsabhängigen (beispielsweise ansichtsbasierten) Routenkenntnis wäre also zu erwarten, dass Menschen, ähnlich wie Ameisen, in einer neuen Umgebung auf dem Hin- und Rückweg unterschiedlichen Wegen folgen. Diese könnten sich zu verschiedenen Zeitpunkten und von unterschiedlichen Punkten aus etablieren. Bei richtungsinvariantem Routenlernen wäre dagegen zu erwarten, dass identische Strecken für Hin- und Rückweg genutzt werden und dass die Routen sich für beide Richtungen von den selben Orten aus entwickeln. Nicht nur richtungsinvariant erlernte Routen sondern auch eine kognitive Karte, deren Metrik korrekt ist, sollte (ähnlich wie bei Straßenkarten) eine Navigation in beide Richtungen ermöglichen. Hier könnte die zurückgelegte Strecke Informationen über den zunächst aufgrund der neuen Ansicht nicht erkannten Platz liefern.

Nutzung globaler und lokaler Landmarken Eine weitere interessante Frage ist, ob vorwiegend lokal oder global sichtbare Merkmale der Umgebung zur Orientierung genutzt wurden⁴. Hierzu wurden zwei Versuche durchgeführt. Im ersten (*Nebel*, vgl. Kapitel 4) wurde die Sicht auf die nähere Umgebung beschränkt. Sollte für eine erfolgreiche Navigation der Bezug zu distalen Merkmalen notwendig sein, ist hier mit einem deutlichen Einbruch der Leistung zu rechnen. Sollte die Navigation dagegen nur anhand lokaler Merkmale möglich sein, ist zu erwarten, dass die Probanden ähnliche Leistungen zeigen wie in der Trainingssituation. Der umgekehrte Fall, eine Beschränkung auf globale Merkmale, wurde durch die Entfernung jeglicher lokaler Hindernisse realisiert (vgl. Kapitel 5). In dieser Umgebung ist sowohl eine Navigation aufgrund von Wegintegration vorstellbar, als auch eine Reproduktion der Trainingsroute. Eine derartige Reproduktion ohne lokale Landmarken könnte auf drei Mechanismen basieren. Zum einen könnte die Navigation rein mit Hilfe der globalen Landmarken durchgeführt werden. Dies ist allerdings unwahrscheinlich, da deren Bild sich durch geringfügige Änderung der Position kaum verändert und damit die Unsicherheit groß sein sollte. Eine zweite Möglichkeit ist durch ein gut etabliertes Motorprogramm gegeben, welches sich während des Trainings ausgebildet haben müsste. Eine dritte Möglichkeit wäre, dass während der Navigation die Lage der lokalen Landmarken aus dem Gedächtnis reproduziert wird und aufgrund dieser Reproduktion Bewegungsentscheidungen getroffen werden.

Suchstrategien In einem letzten Versuch sollte schließlich untersucht werden, was für Muster und Strategien gezeigt werden, wenn einer der Zielpunkte nach erfolgtem Training entfernt wird (vgl. Kapitel 8). Wie gut wird die Zielposition eingeschätzt und wie groß ist die Sicherheit der Probanden, dass sie am korrekten Ort suchen?

³ Die virtuelle Umgebung wurde an die Verteilung von Grasbüscheln um dieses Ameisennest angelehnt, dessen Bewohner des öfteren als Teilnehmer von Feldstudien genutzt wurden (um einen Eindruck von der Umgebung zu erhalten siehe auch <http://galliform.bhs.mq.edu.au/ken/index.html>, Stand Dezember 2007). In Anlehnung an diese Herkunft wurden die Ziele in der vorliegenden Arbeit ebenfalls als "Nest" und "Feeder" bezeichnet.

⁴ Analog zu Steck und Mallot (2000) werden in diesem Kontext alle distalen Umgebungsmerkmale, die in großen Bereichen der Umgebung sichtbar sind, als globale Landmarken bezeichnet (vier farbige Säulen, Wolken, Wald). Umgebungsmerkmale die nur aus begrenztem Abstand sichtbar sind, werden als lokale Landmarken bezeichnet (insbesondere die Hindernisse).

1.3 Virtuelle Umgebungen

Die Verwendung virtueller Umgebungen für Navigationsaufgaben ist immer mit einer klaren Einschränkung der zur Verfügung stehenden Reize verbunden. Dadurch lässt sich in großem Maße kontrollieren, welche Reiztypen bei der Navigation genutzt werden können. Während beispielsweise immersive virtuelle Umgebungen (etwa mittels Brille und Tracking-System) reale Körperbewegungen erlauben, bei denen die visuellen Informationen der simulierten Umgebung entsprechen, stehen im Falle eines Desktop- oder Leinwand-gebundenen Versuches nur die begrenzten motorischen Informationen von der manuellen Steuerung sowie visuelle Informationen zur Verfügung. Die manuelle Steuerung schließlich kann durch "passive", also vom Versuchsleiter gesteuerte Bewegung unterbunden werden. Das Bild kann sowohl über die Größe des Blickfeldes als auch durch die Qualität der Simulation manipuliert werden.

Wegintegration beispielsweise basiert auf verschiedenen Systemen, mit deren Hilfe die Eigenbewegung geschätzt werden kann. Neben allothetischen (beim Menschen spielen hier insbesondere visuelle Reize eine Rolle, möglicherweise jedoch auch akustische und haptische) werden auch idiothetische Informationen (selbstgenerierte Assoziationen zwischen Körperbewegungen und Sinneseindrücken von Motorefferenzen, vestibulärem System und Propriozeption) genutzt, die in einer virtuellen Desktop-Umgebung kaum zum Tragen kommen. Beim Menschen scheinen visuelle Eindrücke widersprüchliche idiothetische Eindrücke jedoch zu "überstimmen", man denke an die Illusion von Eigenbewegung beim Anblick eines bewegten Musters auf einer Leinwand (engl. *vection*) oder dem neben dem eigenen Zug abfahrenden Nachbarzug (engl. *moving train illusion*). Auch bei Ratten gibt es Hinweise darauf, dass die "äußeren" Sinneseindrücke (taktile, visuell, akustisch, olfaktorisch) die idiothetischen Signale "überstimmen" können. So verarbeiten *Head Direction Cells* (Postsubiculum und anteriore thalamische Nuclei), deren Aktivität von der momentanen Ausrichtung des Tieres in der horizontalen Ebene abhängt, nach Taube und Burton (1995) sowohl idiothetische Signale als auch durch äußere Sinneseindrücke vermittelte Informationen über Landmarken. Solange derartige Landmarkeninformationen zur Verfügung stehen, werden diese von den Head Direction Cells bevorzugt verwendet. Dennoch scheinen besonders Rotationen deutlich besser eingeschätzt werden zu können, wenn aufgrund einer realen, selbst durchgeführten Bewegung kinästhetische Stimuli zur Verfügung stehen oder zumindest ein vestibulärer Reiz geboten wird, als wenn die Rotation anhand von visuellen Eindrücken abgeschätzt werden muss (Bakker u. a. 1999).

Allerdings belegen eine Reihe von Experimenten zur Wegintegration in virtuellen Umgebungen (beispielsweise Bremmer und Lappe 1999, Kirschen u. a. 2000, Kearns u. a. 2002, Riecke u. a. 2002, Gramann u. a. 2005, Wiener und Mallot 2006), dass Navigation, speziell auch Wegintegration, allein aufgrund von visuellen Stimuli beim Menschen möglich ist.

Des Weiteren kann durch eine virtuelle Umgebung gewährleistet werden, dass die Erfahrung für alle Probanden dieselbe ist. Keiner der Probanden kann zuvor Erfahrung mit der Umgebung gesammelt haben, Wetterverhältnisse und ähnliches müssen nicht beachtet werden. Außerdem kann mit wenig Aufwand in einer relativ großen Umgebung gearbeitet werden, die nicht zu einfach zu erlernen ist. Die Messung und Speicherung von Positionsdaten und der Ausrichtung (allerdings ohne Betrachtung von Augenbewegungen und ähnlichem) ist ebenso problemlos möglich, wie die Durchführung von Pointingversuchen. In der Realität ist ein "Aussetzen" der Probanden an beliebigen Orten nicht ohne hinweisgebende Anfahrt, so verwirrend diese auch gehalten sein mag, möglich. Als Alternative zum Positionieren der Probanden an die betreffenden Orte könnten Aufnahmen der Umgebung verwendet werden. Allerdings entspricht dies nicht der Trainingssituation, da freie Rotation bzw. Änderungen des Blickwinkels nicht möglich sind. Panoramabilder liefern zwar ein unbegrenztes Sichtfeld, sind aber für Menschen mit ihrem begrenzten Sichtfeld unnatürlich und dadurch schwieriger zu interpretieren. Viele Pointingexperimente zu realen Umgebungen greifen auf eine vorgestellte Positionsänderung zurück ("Stellen Sie sich vor, Sie stünden am Hauptbahnhof neben der großen Uhr."). Allerdings ist zu erwarten, dass für eine solche Aufgabenstellung andere Fähigkeiten eine Rolle spielen (*perspective taking* und *spatial updating* etwa), im Gegensatz zu dem Fall, in dem die Umgebung tatsächlich zum Zeitpunkt des Pointings sichtbar ist.



Abbildung 1: 360° Panorama der verwendeten Umgebung in der Nähe des "Feeders" (roter Ball). Der umrahmte Bereich entspricht dem auf dem Bildschirm sichtbaren Ausschnitt.

2 Material und Methoden

2.1 Beschreibung der verwendeten virtuellen Umgebung

Die verwendete virtuelle Umgebung (Abb. 1, Seite 14 und Karte in Abb. 2, Seite 14) wurde mit Virtual Environments Library (veLib) erstellt.⁵ Sie basiert auf der Verteilung von Grasbüscheln, die in der Nähe eines Ameisennestes (*Melophorus bagoti*) bei Alice Springs in Australien kartographiert wurden (Kohler und Wehner 2005). Statt der Grasbüschel wurden Hindernisse mit geraden Wänden eingesetzt, deren Bodenumriss der Form der Büschel nachempfunden wurde. Höhe und Textur der Hindernisse sind einheitlich gehalten. Die ebenfalls einheitliche Bodentextur unterscheidet sich außerhalb der Hindernisse nicht von der zwischen den Hindernissen. Das Ergebnis ist eine Ebene mit unregelmäßig verteilten Hindernissen, die sich nur anhand ihres Umrisses und ihrer geometrischen Anordnung zueinander bzw. zum Rand auseinanderhalten lassen. Die Hintergrundtextur zeigt Wald und einen Himmel mit unregelmäßiger Bewölkung.

In dem Gebiet zwischen den Hindernissen wurden zwei Zielpositionen (ein blaues "Nest" und ein roter "Feeder") definiert. Diese wurden durch Bälle markiert, die einen Durchmesser von 0.1 virtuellen Entfernungseinheiten (EE) hatten und nur angezeigt wurden, solange eine gewisse Entfernung zu ihnen unterschritten wurde (0.4 EE). Das Ziel galt als erreicht, sobald eine Entfernung von 0.05 EE zum Zentrum des Zielmarkers unterschritten wurde, der Proband mußte den Zielmarker also "berühren". Die Positionen der Zielpunkte wurden für das gesamte Experiment beibehalten. Begonnen wurde bei jeder Sitzung am Nest und wenn möglich sollte dort auch jede Sitzung beendet werden. Um eine globale Orientierungshilfe ("Kompassrichtung") vorzugeben, wurden außerhalb des mit Hindernissen besetzten Bereiches vier hohe, verschiedenfarbige Säulen (vier globale Landmarken: rot, grün, blau, gelb) verteilt.⁶ Zwar können sie an einzelnen Stellen durch Hindernisse verdeckt sein, in der Regel sind sie jedoch gut sichtbar. Die momentane Aufgabe wird ständig als weißer Text in der Mitte des Bildschirms eingeblendet. Auch der Mauszeiger ist sichtbar, kann jedoch vom Probanden aus dem Blickfeld geschoben werden. Der Proband navigiert mit Hilfe eines Joypads durch die Umgebung. Zwei Steuerknüppel (Analogsticks) ermöglichen voneinander unabhängige Rotations- und Translationsbewegungen. Die maximale Translationsgeschwindigkeit lag bei 0.4 Entfernungseinheiten pro Sekunde, die maximale Rotationsgeschwindigkeit bei 26° pro Sekunde.

Während der Versuche wurden in einem Zeitintervall⁷ von 200ms die Position (als x- und y- Wert in Koordinaten der virtuellen Umgebung), die Blickrichtung (*heading*) und die Zeit seit Versuchsbeginn

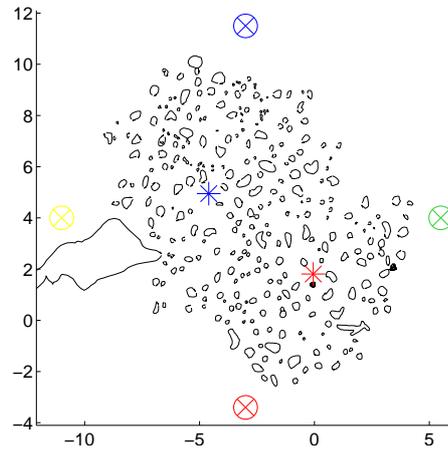


Abbildung 2: Karte der Umgebung. Das Nest befindet sich am blauen, der Feeder am roten Asterisken. Die vier farbigen umkreisten Kreuze deuten an, auf welcher Seite welche globale Landmarke lag.

⁵ Plattformunabhängige C++ Bibliothek
genauere Informationen sind auf <http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/prjs/facilities/velib/>, Stand September 2007, zu finden.

⁶ In Abbildung 2 sind sie aus Gründen der Übersichtlichkeit zu nah an den Hindernissen dargestellt, tatsächlich lagen sie bei (-12.2, 83.3), (67.8, 3.3), (-12.2, -76.8) und (-92.2, 3.3).

⁷ Das Messintervall war nicht vollkommen konstant, gelegentliche längere Werte wurden bei Auswertungen wie der Schrittlänge ausgeschlossen. Insgesamt korreliert die verstrichene Zeit jedoch sehr gut mit der Anzahl der Messpunkte

(*time-stamp*) ausgegeben und gespeichert.

Die Versuche wurden an einem 19"-Monitor durchgeführt, der Proband saß bequem auf einem davor platzierten Drehstuhl. Die Entfernung der Augen zum Bildschirm betrug ungefähr 65 cm. Daraus ergab sich ein reales Sichtfeld von ungefähr 30°. Die tatsächliche Entfernung vom Bildschirm konnte durch die individuelle Haltung der Probanden stark variieren, da keinerlei Vorgaben gemacht und die Probanden in keiner Weise in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt wurden. Es bestand allerdings in jedem Fall eine deutliche Diskrepanz zwischen dem realen und dem virtuellen Sichtfeld, da der von der virtuellen Kamera aufgenommene und auf dem Bildschirm dargestellte Ausschnitt ungefähr 90° der Rundumsicht (rot eingerahmter Bereich in Abbildung 1, Seite 14) entsprach.

2.2 Ablauf der Versuche

In diesem Kapitel soll der zeitliche Ablauf der Versuche dargestellt werden. Die einzelnen Abschnitte sind jeweils in den zugehörigen Kapiteln genauer erläutert.

Die Versuche dauerten pro Tag und Proband 60 bis 105 Minuten und wurden an vier bis fünf aufeinanderfolgenden Tagen, jeweils beginnend an einem Montag, durchgeführt. Am ersten Tag wurde als erstes eine Einverständniserklärung unterzeichnet (vgl. Anhang B.1), die darüber informierte, dass möglicherweise simulationsbedingter Schwindel und Übelkeit auftreten könnten, der Versuch aber jederzeit abgebrochen werden könne. Im Anschluss absolvierten die Probanden einen Vortest (Perspective Taking Ability Test, kurz PTA-Test, vgl. Kapitel 2.4, Seite 16). Zusätzlich wurde noch ein Fragebogen ausgefüllt. Hier sollten die Probanden ihre bisherigen Erfahrungen mit Computern, insbesondere mit 3D-Spielen und ähnlichem, angeben, sowie ihren "Orientierungssinn" einschätzen (vgl. Anhang B.2). Danach absolvierten die Probanden ihr erstes Training, wonach der erste Versuchstag beendet wurde. Da sich in einem Vortest herausgestellt hatte, dass die gegebene Aufgabe nicht innerhalb eines Trainingstages zu erlernen war, wurde das Training an den folgenden Tagen wiederholt. Ein Training umfasste jeweils zwei Sitzungen à 20 Minuten mit einer fünf-minütigen Pause dazwischen. Die Versuchsperson hatte die Aufgabe, wiederholt von der Startposition (am Nest, markiert durch einen blauen Ball) zum Ziel (Feeder, roter Ball) und wieder zurück zu laufen. Im Anschluss an die zweite Trainingseinheit wurde ab dem zweiten Versuchstag nach einer kurzen Pause die Pointingaufgabe durchgeführt. Hierbei wurde der Proband zu verschiedenen Punkten in der Umgebung gebracht und sollte jeweils zu beiden Zielen deuten (vgl. Kapitel 6, Seite 63).

Das Training wurde täglich wiederholt, bis der Proband im Tagesmittel sowohl auf dem Hinweg als auch auf dem Rückweg (getrennt betrachtet) eine "Leistung" von mindestens 2 Pfaden pro Minute erreichte. Am selben Tag, spätestens jedoch am vierten Tag, wurde vor oder direkt nach der Pointingaufgabe (Reihenfolge abwechselnd) die "Wegintegrationsaufgabe" durchgeführt. Hierbei musste der Proband auf seiner normalen Route bis zum Feeder laufen. Dann verschwanden alle lokalen Hindernisse, der Proband lief zurück bis zu dem Punkt, an der er das Nest vermutete. Durch Tastendruck bestätigte er seine Wahl. Dies wurde drei Mal wiederholt. Es wurden keinerlei ablenkenden Aufgaben (Kopfrechnen oder Ähnliches) gestellt.

Am folgenden Tag, spätestens an der zweiten Sitzung des fünften Tages, wurde die Suche durchgeführt. Setup und Vorbereitung des Probanden unterschieden sich nicht vom Training, doch nachdem die Versuchsperson drei bis acht Mal den Feeder gefunden hatte (je sicherer der Proband einer Route folgte, desto früher), tauchte das Nest auf dem Rückweg nicht mehr auf. Das Programm lief danach noch zwei Minuten lang, während derer der Proband das Nest suchte. Danach wurde es automatisch beendet und der Proband über das nicht zu erkennende Ziel aufgeklärt. Im Anschluss wurden die beiden Versuche "Homing" und "Nebel" durchgeführt, ihre Reihenfolge ist über die Probanden ausgeglichen. Es wurde darauf hingewiesen, dass alle Zielpunkte im Folgenden immer auftauchen würden. Zu Beginn jedes Versuchs wurde dem Probanden ein Blatt mit Informationen über die jeweilige Aufgabe und den genauen Ablauf vorgelegt (vgl. Anhang C.1, Seite 96).

Die zeitliche Verteilung der Versuche ist in Tabelle 1 (Seite 16) nochmals dargestellt.

(Korrelationskoeffizient=1.0000, siehe Abbildung 62 in Anhang D.1), so dass größere Abweichungen von der Abtastrate ausgeschlossen werden können.

Tabelle 1: Ablauf der Versuche. Ein '+' bedeutet, dass der jeweilige Versuch durchgeführt wurde, ein '-', dass er nicht durchgeführt wurde.

	erster Tag	Trainingstage (2-3)	letzter Tag
PTA-Test	+	-	-
Training	+	+	evtl. eine Sitzung
Pointing	-	+	-
Wegintegration	-	am letzten Trainingstag	-
Suche	-	-	+
Homing	-	-	+
Nebel	-	-	+

2.3 Probanden

Bei den Probanden handelte es sich um elf Studenten (5m, 6w) der Universität Tübingen. Sie waren zwischen 19 und 27 Jahre alt (im Mittel 22,8 Jahre). Die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 8 Euro pro Stunde. Im Folgenden wird jedem Proband ein eindeutiges Kürzel zugewiesen. Für alle Probanden wird im Text nur die männliche Form verwendet, das Geschlecht ist in Anhang A angegeben.

2.4 PTA-Test

Der PTA-Test⁸ wurde am Bildschirm durchgeführt. In dem Test wird eine Gruppe von Objekten, sowie ein zwischen ihnen platzierter Agent aus der Vogelperspektive dargestellt. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, sich in die Perspektive dieses Agenten hineinzusetzen (englisch *perspective taking*) und die egozentrische Richtung (rechts/links/vorne/hinten) zu einem einige Sekunden nach Erscheinen der Aufsicht genannten Objekt anzugeben. Die Angabe erfolgt mittels eines Pfeils (8 Richtungen zur Auswahl), dessen Ausrichtung wiederum auf die reale Position des vor dem Bildschirm sitzenden Probanden bezogen ist. Der Test ist in Kozhevnikov u. a. (2006) näher beschrieben.

Mit diesem Test sollte überprüft werden, ob das Ergebnis des Testes als Voraussage über die Leistung eines Probanden in einem der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche dienen konnte.

⁸ Perspective Taking Ability Test, computerized version 1.0, by MM Virtual Design LLC.

2.5 Statistik

Kolmogorow-Smirnov Der Kolmogorow-Smirnov-Test überprüft, ob zwei unabhängige Stichproben der selben Verteilung entstammen. Er wurde hier genutzt, um zu überprüfen, ob einer Stichprobe ein bestimmter Verteilungstyp (Normalverteilung) zugrunde gelegt werden kann. Er ist, im Gegensatz zum χ^2 -Test, auch für kleine Stichprobenumfänge geeignet. Verwendet wurde die Funktion `kstest` (matlab R2006b, Statistics Toolbox).

Nullhypothese: Das Merkmal X hat die Verteilung F_0 .

Es wird eine verteilungsunabhängige Teststatistik berechnet (vgl. dazu Sachs 1968, Seite 427ff). Ist der ermittelte Wert mindestens so groß wie der entsprechende Tabellenwert, wird die Nullhypothese unter dem entsprechenden Signifikanzniveau verworfen.

Wilcoxon Der Wilcoxon-Test für Paardifferenzen (vgl. Sachs 1968, Seite 411) ist ein nicht-parametrischer Test für den Vergleich gepaarter Stichproben. Er testet, ob die Differenzen der Wert-Paare symmetrisch mit dem Median gleich 0 verteilt sind. Er wurde genutzt, um individuelle Veränderungen der Probanden festzustellen, beispielsweise zu Beginn und am Ende des Trainings. Verwendet wurde die Funktion `signrank` (matlab R2006b, Statistics Toolbox).

Nullhypothese: die Paardifferenzen entstammen einer Grundgesamtheit mit Verteilungsfunktion $F(d)$ und Dichte $f(d)$:

$$H_0 : F(+d) + F(-d) = 1 \text{ bzw. } f(+d) = f(-d) \quad (1)$$

Es werden über die paarweisen Differenzen Ränge verteilt. Getrennt nach Vorzeichen dieser Differenzen werden über die zugehörigen Ränge zwei Summen $\hat{R}_{positiv}$ und $\hat{R}_{negativ}$ gebildet. Die kleinere Summe dient als Prüfgröße. Ist sie kleiner oder gleich dem tabellierten Wert, wird die Nullhypothese verworfen.

Page Der Trend-Test nach E. Page (Page 1963) ist ein nicht-parametrischer Test. Er wird verwendet, um Serien abhängiger Stichproben auf eine vorgegebene Reihenfolge gegen die Nullhypothese einer Gleichheit aller Werte zu testen. Er wurde verwendet, wenn überprüft werden sollte, ob die Daten eines Probanden sich in vorgegebener Weise über verschiedene Versuchbedingungen oder Messwiederholungen veränderten (beispielsweise monoton anstiegen) und für alle Probanden aus jeder Kategorie Werte vorlagen.

Nullhypothese: Gleichheit der Messwiederholungen.

Alternativhypothese: vorgegebene Reihenfolge der Größe der Messwiederholungen.

Für jeden Probanden werden getrennt den Messwerten Ränge zugeordnet. Anschließend wird für jede Bedingung die Summe über die Ränge der entsprechenden Messwerte aller Probanden gebildet. Diese werden mit der hypothetischen Rangsumme (erwarteter Rang der Bedingung multipliziert mit der Anzahl der Probanden) multipliziert und die erhaltenen Produkte wiederum aufaddiert. Ist die resultierende Testgröße L mindestens so groß wie der zugehörige Tabellenwert, wird die Nullhypothese abgelehnt.

Steigerung zwischen zwei Sitzungen Die Steigerung von Parameter A zwischen Sitzung j-1 und Sitzung j soll bestimmt werden. Dazu wurden jeweils die Daten der Probanden verwendet, die an Sitzung j teilgenommen haben (Anzahl sei n), diese waren immer auch an Sitzung j-1 beteiligt. Bestimmt wird die mittlere Differenz als

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{i,j} - A_{i,j-1} \quad (2)$$

dabei ist j die Nummer der Sitzung und i die Nummer des Probanden.

Diskussion der Änderungsanalyse: Diese Art der Auswertung wurde besonders bei der Analyse der Trainingsdaten eingesetzt, da die Werte der Probanden sich hier mitunter stark unterschieden. Besonders SM22 (und IW25, der allerdings aus diesen Auswertungen gänzlich ausgeschlossen wurde) zeigte häufig deutlich niedrigere Werte als die anderen Probanden. Ein schönes Beispiel bietet die Entwicklung der Schrittlänge. Die meisten Probanden, und insbesondere SM22, sind mit zunehmendem Training immer schneller gelaufen. SM22 ist jedoch zu Beginn sehr langsam gelaufen und hat diese Differenz zu den anderen bis zum Ende des Trainings nicht ganz beseitigt. Werden nun die Werte aller Probanden gemittelt, um den generellen Aufwärtstrend der Geschwindigkeit zu zeigen, so ergibt sich ein Verlauf wie in Abbildung 3: Bis zur sechsten Sitzung steigt die Kurve, dann fällt sie wieder ab, weil die niedrigen Werte von SM22 mit abnehmender Probandenzahl zunehmend bestimmend werden - der letzte Wert schließlich basiert nur noch auf den Daten von SM22.

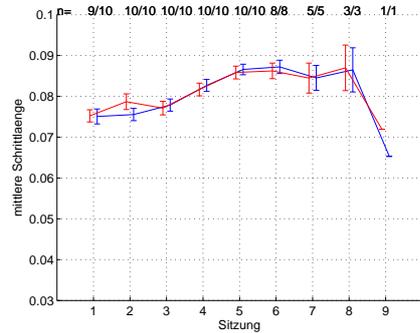


Abbildung 3: Über alle Probanden (außer IW25) gemittelte Entwicklung der Schrittlänge während des Trainings \pm Standardfehler. Die rote Linie bezieht sich auf den Hinweg zum Feeder (2. Wert von n), die blaue auf den Rückweg zum Nest (1. Wert von n).

Betrachtet man dagegen jeweils die Änderung zwischen zwei Sitzungen, ignoriert also den Absolutwert, so läßt sich die tatsächliche Entwicklung darstellen: Die Änderung ist in nahezu jedem Fall positiv (vgl. Abbildung 16b, Seite 29). Allerdings lassen sich so "Sättigungseffekte", wie sie etwa durch die Beschränkung der Schrittlänge auf ungefähr 0.108 EE entstehen, nicht mehr nachvollziehen. Diese Auswertung ist allerdings sehr anfällig für Ausreißer: Zeigt ein einziger Proband eine zu den anderen Probanden gegensätzliche Änderung und übersteigt die Differenz seiner Werte die Summe der Differenzen der anderen Probanden, so folgt das Vorzeichen der Änderung an dieser Stelle der Entwicklung des einen Probanden, auch wenn alle anderen eine entgegengesetzte, aber auch in der Summe geringere Entwicklung zeigten.

3 Training

3.1 Fragestellung und Durchführung

In unserem Alltag spielt das Kennenlernen unbekannter Umgebungen eine große Rolle. Dennoch gibt es nur wenige Untersuchungen dazu, wie sich das Verhalten von Menschen während eines solchen Lernvorganges in großen, unregelmäßig strukturierten Umgebungen wie der vorliegenden verändert. In dem hier vorgestellten Versuch lernten die Probanden die zu Beginn unbekannt virtuelle Umgebung während mehrerer Trainingssitzungen kennen. Am Ende des Trainings sollten sie in der Lage sein, zwischen zwei vorgeschriebenen und unveränderlichen Zielpunkten sicher hin und her zu navigieren.

In diesem Kapitel werden verschiedene Parameter der resultierenden Trajektorien, wie Geschwindigkeit, Kurvigkeit und Pausenanzahl, während des Trainings verfolgt und ihre Veränderungen beschrieben.

Eine Trainingssitzung dauerte 20 Minuten. Während dieser Zeit sollten die Probanden auf beliebigen Wegen zwischen den beiden Zielpunkten "Nest" und "Feeder" hin und her navigieren, was auf einer annäherungsweise idealen Route ungefähr 11 Sekunden dauerte. Die Sitzungen begannen immer am Nest und sollten erst beendet werden, nachdem das Nest nach Ablauf der vorgegebenen Zeit wieder erreicht worden war.⁹ Die Probanden wurden weder aufgefordert, einen möglichst kurzen Weg zu suchen, noch, bei jedem Durchgang den selben Weg zu wählen. Als Hilfestellung wurde ihnen ein Blatt vorgelegt (vgl. Anhang C.1, Seite 96), welches sie darüber informierte, dass der Feeder vom Nest aus gesehen zwischen der roten und der grünen globalen Landmarke und umgekehrt das Nest vom Feeder aus gesehen zwischen der blauen und der gelben globalen Landmarke liege und dass beide Marker nur aus nächster Nähe sichtbar seien. Des Weiteren war dort eine Erklärung zur Handhabung des Joypads zu finden. Das Blatt lag während jedem Training neben dem Probanden auf dem Tisch. Die Probanden wurden jeden Tag danach gefragt, an was sie sich in der Umgebung orientierten. Dies geschah mündlich ("An was orientierst du dich?"), nicht mit Hilfe eines Fragebogens.

Im Folgenden wird jeweils eine Trajektorie zwischen Nest und Feeder als Pfad bezeichnet. Der erste Pfad beginnt jeweils mit dem Beginn des Experimentes und endet (wie jeder folgende) mit dem Erreichen des nächsten Zieles. Unmittelbar darauf (also nicht etwa mit dem Verlassen des Zielpunktes) beginnt der nächste Pfad. Gewertet wurden alle Pfade, die durch das Erreichen des jeweils folgenden Zieles vervollständigt wurden. Da die Ausgangsposition in jedem Fall am Nest lag, wird der Pfad vom Nest zum Feeder als "Hinweg" und der zurück zum Nest als "Rückweg" bezeichnet. Das Training wurde wiederholt, bis der Proband in beiden Laufrichtungen im Tagesmittel eine "Effektivität" von mindestens 2 Pfaden pro Minute erreichte, was je nach Proband zwischen 5 und 9 Sitzungen lang dauerte. Danach, spätestens jedoch nach der ersten Sitzung des fünften Tages, wurde das Training beendet. Dabei ergab sich das Problem, dass die Motivation bei einigen Probanden schon vor Erreichen des Lernzieles deutlich nachliess.¹⁰ Es ist bekannt, dass die Motivation für jeden Lernerfolg entscheidend ist (beispielsweise Harlen und Crick 2003, Smallwood u. a. 2007, Engelmann und Pessoa 2007). Da nicht zu erwarten war, dass ihre Leistung bei einer Fortsetzung des Trainings nennenswert verbessert würde, wurde das Training bei TK23 und AN19 verfrüht abgebrochen (vgl. allerdings Anmerkung Kapitel 8, Seite 85). Beide fanden den Weg zum Nest bereits sehr gut, während auf dem Weg zum Feeder das Lernkriterium noch nicht erfüllt war. Ein weiterer Proband (EH23) musste aus Zeitmangel das Training abkürzen, konnte jedoch trotzdem an allen Versuchen teilnehmen.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Fragebogen

Die zu Beginn der Versuche angegebene Computerspiel-Erfahrung reichte von 1 (kaum Erfahrung) bis 9 (Maximalwert), der Mittelwert lag bei 4.2 ± 3.1 . Auch die Erfahrung mit dem Joystick umfasste Werte von 1 bis 9, wobei der Mittelwert bei 3.9 ± 2.5 lag. Die Selbsteinschätzung des eigenen Navigationsvermögens reichte von 4 bis 8, mit einem Mittelwert von 6.2 ± 1.3 . Die angegebenen Fehler sind jeweils die Standardabweichungen. Alle Werte sind in Tabelle 2 auf Seite 20 angegeben.

⁹ In einem Fall wurde eine Sitzung jedoch am Feeder beendet, um der Versuchsperson ohne vorherige Rückkehr zum Nest eine Pause zu ermöglichen, da der Feeder in diesem Fall erst nach über 20 Minuten das erste Mal gefunden worden war. Für diese Sitzung (TS21, erste Sitzung) existiert dementsprechend kein Rückweg zum Nest.

¹⁰ Unaufmerksam. Beschweren sich über die zu einfache Aufgabe, fragten häufig nach der Restzeit.

Tabelle 2: Angaben der Probanden vor Beginn der Versuche

	AN19	AS25	BG27	EH23	FW23	IW25	SM22	SN23	SP20
Spiele-Erfahrung	9	3	6	9	2	3	2	7	1
Joystickerfahrung	3	3	6	9	2	6	1	6	1
Navigationsvermögen	4	6	6	8	6	6	6	4	8

	TK23	TS21	Mittelwert	Standardabweichung
Spiele-Erfahrung	1	3	4.2	3.1
Joystickerfahrung	4	2	3.9	2.5
Navigationsvermögen	7	7	6.2	1.3

3.2.2 Beschreibung der Trajektorien

Um auszuwerten, welche Flächen die Probanden während des Trainings absuchten, wurden für jede Trainingssitzung die Fehlerellipsen der gemessenen Probandenpositionen bestimmt (nach Mallot Sommersemester 2006). Sie sind in Abbildung 4 auf Seite 21 dargestellt.¹¹ Zu Beginn des Trainings wurde oft nahezu die gesamte Umgebung abgesucht. Die über alle Probanden mit Ausnahme von IW25 gemittelte Fläche der Fehlerellipse betrug im ersten Training 24.3 EE^2 , bei einem Standardfehler von 4.2 EE^2 zum Nest und $37.3 \text{ EE}^2 \pm 4.6 \text{ EE}^2$ zum Feeder. Mit jeder folgenden Sitzung wurde der abgesuchte Bereich kleiner, so dass im letzten Training die mittlere Ellipsenfläche nur noch bei $5.9 \text{ EE}^2 \pm 1.8 \text{ EE}^2$ zum Nest und $8.0 \text{ EE}^2 \pm 1.7 \text{ EE}^2$ zum Feeder lag. Der Rangsummentest nach Wilcoxon¹² ergab für beide Richtungen einen hochsignifikanten Trend¹³ ($p_{\text{Hin}} < 0.005$ und $p_{\text{Rück}} < 0.01$). Um einen Eindruck zu vermitteln, welche Wege die Probanden während des Trainings zurücklegten, sind die Trajektorien aller Trainingssitzungen eines Probanden (TK23) in Abbildung 5 (Seite 22) dargestellt.¹⁴ Hier ist auch erkennbar, dass die Fläche, die in einer Richtung (beispielsweise zum Feeder) abgesucht wurde, manchmal später schrumpfte als die in der anderen Richtung abgesuchte: TK23 folgte bereits in der 4. Sitzung auf dem Weg zum Nest (blaue Linien) einer festen Route, während die Wege zum Feeder noch sehr unsicher waren. Häufig waren die auf dem Hin- und Rückweg abgesuchten Bereiche verschieden. Auch dies lässt sich am Beispiel von TK23, besonders während der ersten drei Sitzungen, verdeutlichen. Fünf weitere Probanden (besonders SM22) zeigten ebenfalls eine mehr oder weniger klare Trennung der in den beiden Laufrichtungen abgedeckten Bereiche. Möglicherweise mit ein Grund für diese unterschiedlichen Suchgebiete war, dass die Position des Nestes häufig falsch eingeschätzt wurde. So hielten sich sieben der elf Probanden in mindestens einer Sitzung häufig zu weit in Richtung der blauen globalen Landmarke (vgl. Abbildung 2, Seite 14) auf. Ein Beispiel bieten die 2. bis 4. Sitzung von AS25 (Abbildung 6, Seite 22).

Verschiedene Probanden nutzten unterschiedliche Strategien, um die Umgebung abzusuchen. AN19 verließ die Umgebung, um sich außerhalb der Hindernisse einen Überblick zu verschaffen (siehe auch Abbildung 7, Seite 23). Eine Strategie, um weite Strecken zurückzulegen, ohne den Bezug zum Ausgangspunkt zu verlieren, bestand darin, eine lange, gerade Strecke vorwärts zu laufen und "im Rückwärtsgang" zum Ausgangspunkt zurückzukehren.¹⁵ Diese geraden Linien wurden entweder wie die Speichen eines Rades oder mehr oder weniger parallel zueinander durchgeführt. BG27 zeigte während der zweiten Trainingssitzung beide Varianten (vgl. Abbildung 8a, Seite 23). Eine andere Möglichkeit, das Gebiet möglichst gründlich abzusuchen, bestand darin, jedes Hindernis einzeln zu umkreisen, so dass geradezu ein Rüschenmuster entsteht (vgl. Abbildung 8b, Seite 23). In dem hier gezeigten Beispiel

¹¹Die hier verwendete Farbcodierung der Probanden ist in Anhang A aufgelistet.

¹²Zur Auswahl der Tests vgl. Kap. 3.2.11, Seite 39

¹³Für TS21 (rotes Dreieck nach hinten) existiert wie bereits beschrieben in der ersten Sitzung kein Pfad zum Nest, daher wird dieser Proband hier und in folgenden entsprechenden Tests nur bei den Pfaden zum Feeder mit einbezogen.

¹⁴Sämtliche Trainingstrajektorien sind auch in Anhang D.2.1 einzusehen.

¹⁵Die Häufigkeit und Länge, mit der ein Proband im Rückwärtsgang navigierte, stellt einen weiteren individuellen Unterschied zwischen den Probanden dar. Während beispielsweise AN19 so gut wie nie rückwärts lief, taten BG27 und IW27 dies häufig und über weite Strecken hinweg. Unterschiedlich war auch, wie erfolgreich ein Proband auf dem selben Weg rückwärts zurüchnavigieren konnte, den er gerade vorwärts zurückgelegt hatte. Möglicherweise bietet dies einen Hinweis auf die Lerngeschwindigkeit und das Navigationsvermögen. Dieser Parameter wurde jedoch nicht näher untersucht.

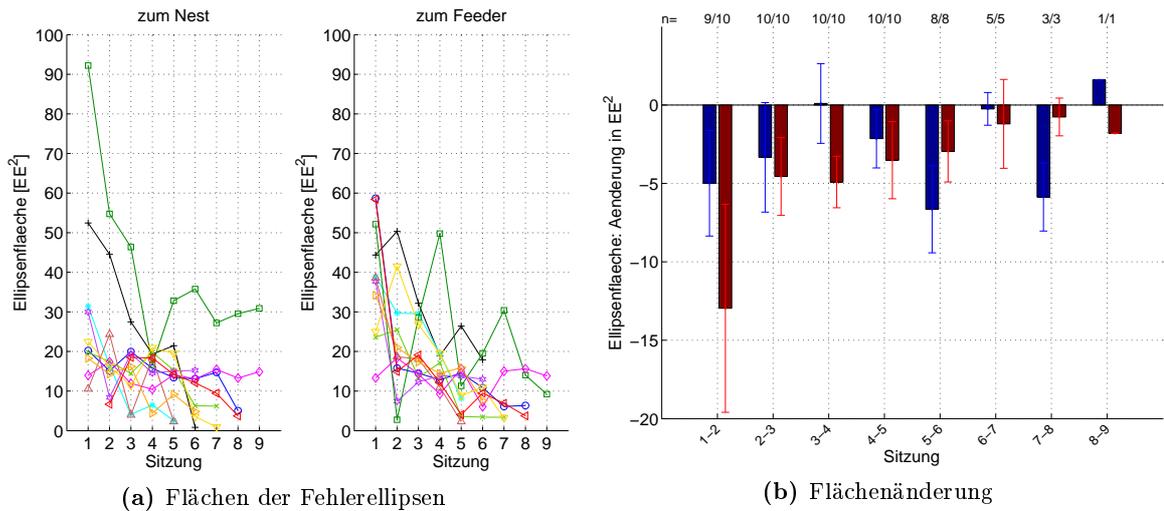


Abbildung 4: Fehlerellipsen der Trainigstrajektorien. **a:** Flächen der für die einzelnen Sitzungen bestimmten Fehlerellipsen aller Probanden. Die Abbildung **links** beschreibt die Trajektorien zum Nest, die Abbildung **rechts** die zum Feeder. In **b** ist die mittlere Änderung der Ellipsenflächen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Sitzungen dargestellt.

Die blauen Balken geben die Trajektorien zum Nest wieder (1. Wert von n), die roten Balken die Trajektorien zum Feeder (2. Wert von n).

wurde diese zeitaufwendige Methode so intensiv angewandt, dass der Proband in der ersten Sitzung das Ziel kein einziges Mal erreichte, so dass nur der Pfad zum Feeder existiert - der Rückweg zum Nest wurde weggelassen, um dem Probanden eine Pause zu erlauben. Aber auch andere Probanden (SM22, SN23) suchten die Umgebung gelegentlich auf diese Art ab.

Da die Zielpositionen nur sichtbar wurden, wenn man relativ nahe an ihnen vorbei navigierte (0.4 EE), war es möglich, auf dem korrekten Platz an ihnen vorbei zu laufen, ohne sie zu bemerken. Eine Strategie, das zu vermeiden, bestand darin, Plätze mit kleinen sternchenförmigen Suchmustern abzutasten. Als Beispiel ist in Abbildung 8c (Seite 23) ein Ausschnitt der Umgebung mit den Trajektorien der sechsten Sitzung von TS21 gezeigt. Beinahe alle Probanden (Ausnahmen: FW23, SN23) nutzten diese Methode, um Plätze abzusuchen, wobei die Häufigkeit, mit der sie angewendet wurde, sich stark unterschied. Auch bei der Suche (vgl. Kapitel 8) waren derartige Sternchen häufig zu sehen.

3.2.3 Ähnlichkeit der letzten Pfade

Bei der Betrachtung der im Anhang dargestellten Trajektorien fällt auf, dass einige Probanden sehr stabile Routen etablierten, welchen sie konstant folgten (beispielsweise FW23, vgl. Abbildung 9a, Seite 24). Andere Probanden dagegen wählten bei jedem Durchgang einen etwas anderen Weg (etwa AS25, vgl. Abbildung 9b). IW25 hat, wie bereits erwähnt, die Aufgabe auch am 5. Traininstag nicht beherrscht. Die letzten Trajektorien sind in Abbildung 9c gegeben.

Um ein quantitatives Maß zu erhalten, wie ähnlich die letzten Trajektorien eines Probanden einander waren, wurden alle Trajektorien der letzten Sitzung der einzelnen Probanden jeweils paarweise miteinander verglichen. Durchgänge, die sich deutlich von den anderen unterschieden (etwa weil der Proband sich verlaufen hatte) sollten dabei von der Auswertung ausgeschlossen werden. Für jeden Proband wurde dazu zunächst die mittlere Streckenlänge während der letzten Sitzung, sowie die zugehörige Standardabweichung ermittelt. Hin- und Rückweg wurden getrennt gewertet. Wuch die Länge einer Trajektorie um mehr als die zweifache Standardabweichung von dem entsprechenden Mittelwert ab, wurde sie von der Analyse ausgeschlossen. Um den Vergleich zu vereinfachen, wurde die Umgebung durch eine Delaunay-Triangulierung in eindeutig nummerierte Dreiecke zerlegt (vgl. Kap. 6). Jeder Trajektorie wurde die Sequenz der Dreiecksindices zugeordnet, durch welche sie verlief. Jede dieser Sequenzen wurde mit jeder anderen verglichen. Dieser Sequenzvergleich wurde nach Needleman-Wunsch (Needleman und Wunsch 1970) durchgeführt. Die so ermittelten paarweisen Ähnlichkeiten wurden über alle Vergleiche gemittelt. Der Vergleich wurde einmal für die Wege zum Feeder untereinander (mittlere Ähnlichkeit der Hinwege), einmal für die Wege zum Nest, ebenfalls untereinander (mittlere

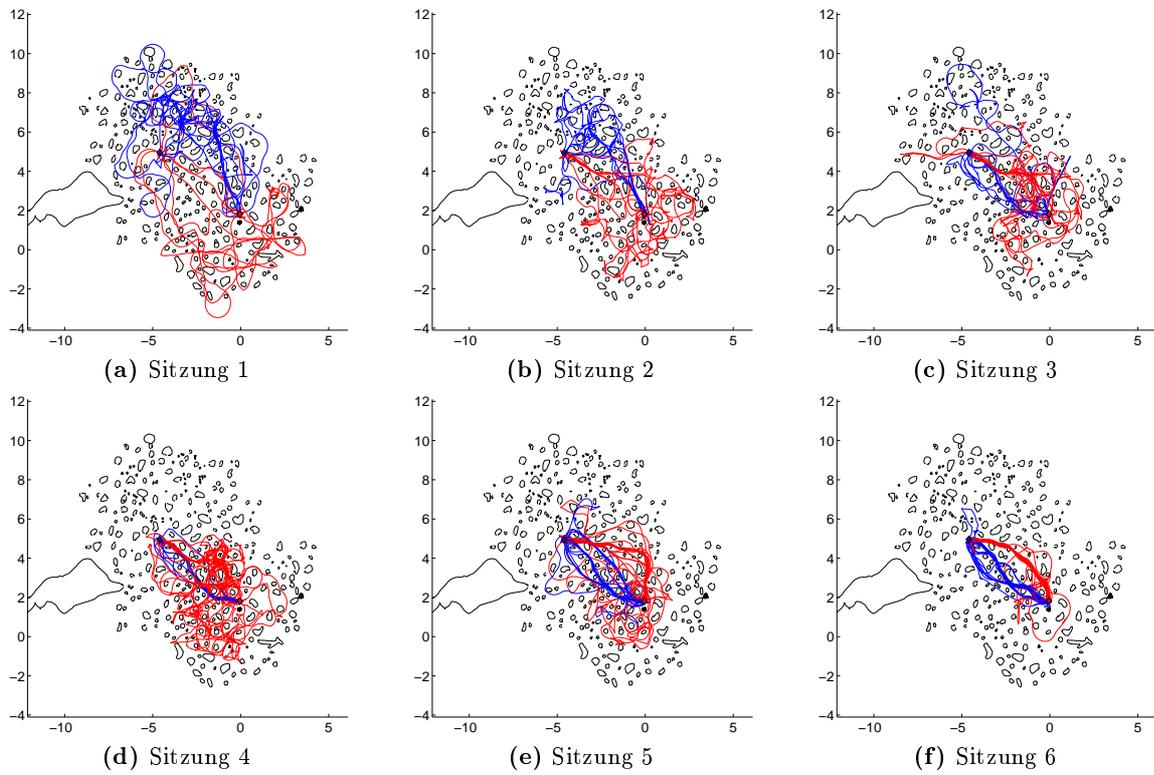


Abbildung 5: Trainingssitzungen von TK23. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot dargestellt.

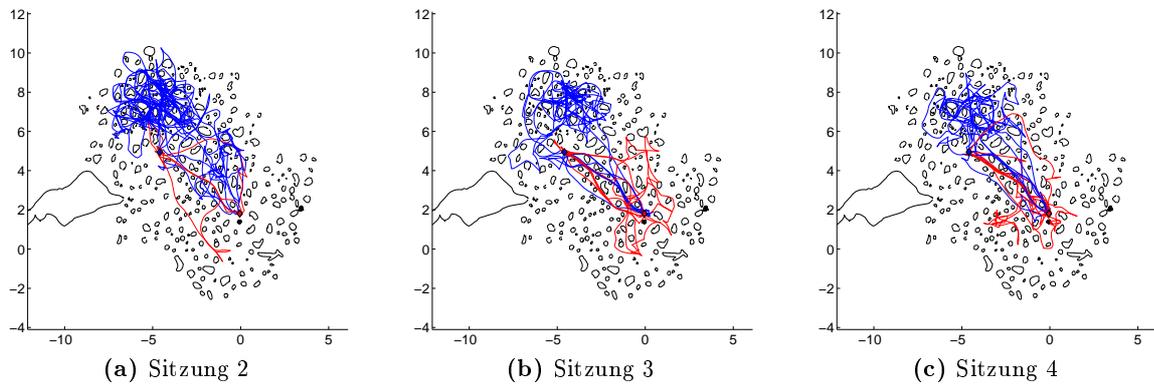


Abbildung 6: Trainingssitzungen 2 bis 4 von AS25. Man beachte den relativ zur Position des Nestes verschobenen Suchschwerpunkt bei den Trajektorien zum Nest (blau). Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot dargestellt.

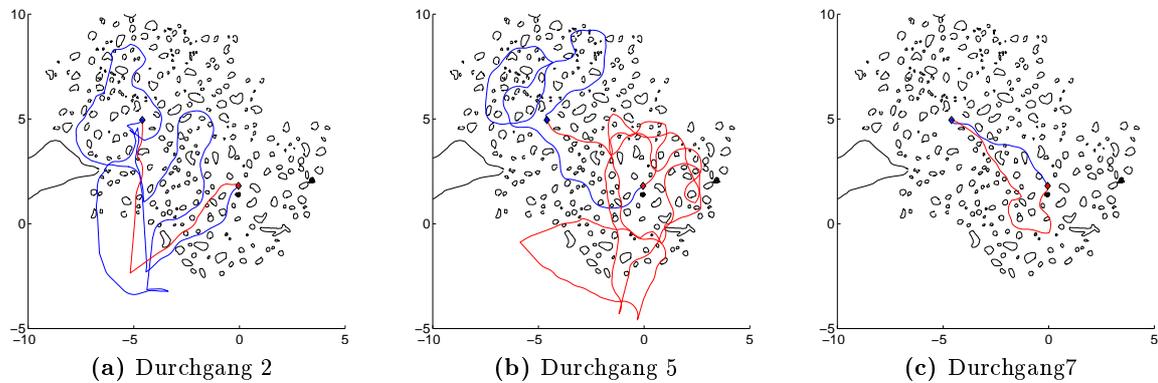


Abbildung 7: Einzelpfade von AN19 während der zweiten Trainingssitzung. Der Proband orientiert sich, indem er die Hindernisumgebung kurz verläßt. In **a** läuft er anschließend das jeweilige Ziel relativ direkt an, in **b** werden trotz der Neuorientierung Umwege gelaufen, in **c** verzichtet er ganz auf einen Aufenthalt außerhalb der Hindernisse. Alle drei Varianten kamen wiederholt vor. Auch in den folgenden Sitzungen zeigte der Proband derartige Orientierungsblicke.

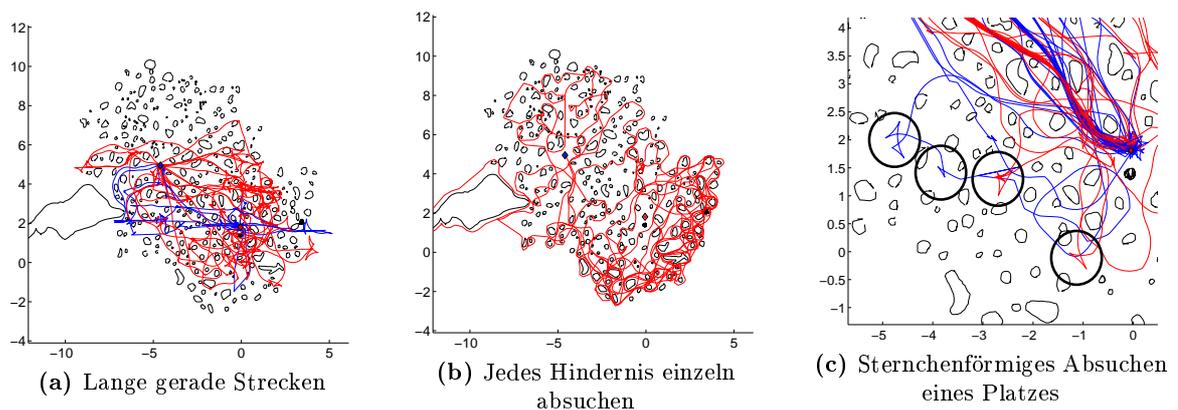


Abbildung 8: Verschiedene Möglichkeiten, die Umgebung abzusuchen. **a:** Zweite Trainingssitzungen von BG27. Man beachte die langen geraden Trajektorienabschnitte, sowie ihre Anordnung (speichenartig oder parallel). **b:** Erste Sitzung von TS21. Jedes Hindernis wird einzeln umkreist und nach dem Zielpunkt (Feeder) abgesucht. **c:** Sechste Sitzung von TS21, Ausschnitt. Man beachte die umkreisten sternchenförmigen Suchmuster.

Pfade zum Nest sind jeweils in blau dargestellt, zum Feeder in rot dargestellt.

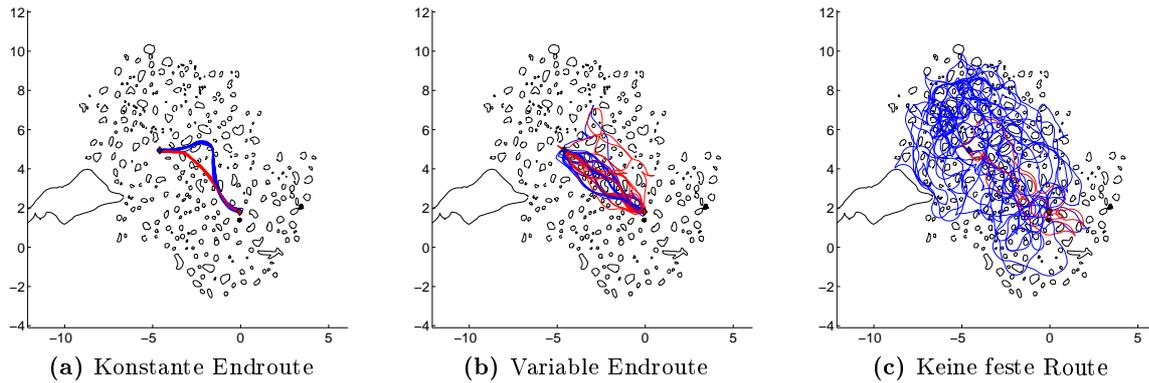


Abbildung 9: Trajektorien von letzten Trainingssitzungen. **a:** Der Proband folgt einer konstanten Route (Hin- und Rückweg verschieden). (7. Trainingssitzung von FW23) **b:** Der Proband variiert die Route kontinuierlich. (8. Sitzung von AS25) **c:** Der Proband hat auch nach 9 Sitzungen noch keinen Weg gefunden, sondern sucht die Umgebung ab. (9. Sitzung von IW25)
In allen Abbildungen sind die Pfade zum Nest jeweils in blau dargestellt, die zum Feeder in rot.

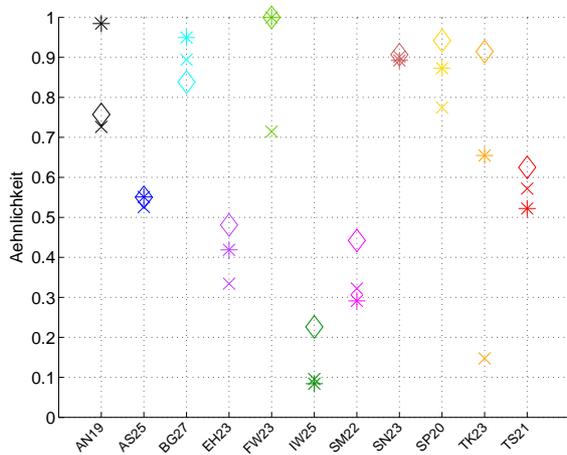


Abbildung 10: Ähnlichkeit der Routen der letzten Trainingssitzung, deren Länge nicht mehr als zwei Standardabweichungen vom Mittelwert aller Trajektorien der letzten Sitzung dieses Probanden abweicht. Für jeden Probanden sind drei Werte angegeben, die aus dem Vergleich aller Trajektorien zum Feeder (◇), dem Vergleich aller Trajektorien zum Nest (*) und schließlich dem Vergleich der Hin- und Rückwege gegeneinander (×) stammen.

Ähnlichkeit der Rückwege) und ein weiteres Mal für alle möglichen Hin-Zurück-Paarungen (Ähnlichkeit von Hin- und Rückweg) bestimmt.

Der Ähnlichkeitswert liegt zwischen 0 (keine Ähnlichkeit) und 1 (identische Sequenz). Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 (Seite 24) dargestellt. Um eine Vorstellung von diesem Ähnlichkeitsmaß zu erhalten, kann wiederum Abbildung 9 herangezogen werden. Besonders auffallend sind die extrem niedrige Ähnlichkeit der Pfade von IW25 (zum Feeder 0.08, zum Nest 0.23, beides verglichen 0.10) sowie die extrem hohe Ähnlichkeit von FW23 (hin 1, zurück 1, beides verglichen 0.71).

Die Ähnlichkeit von Hin- und Rückweg war bei sechs Probanden kleiner als die Ähnlichkeit der einzelnen Richtungen. In keinem Fall war sie größer als die Ähnlichkeit beider Einzelrichtungen, in vier Fällen ist die Ähnlichkeit der Rückwege die kleinste, in einem Fall die der Hinwege.

3.2.4 Pfade pro Minute

Um zu beurteilen, wann das Training abgeschlossen werden konnte, wurde die Anzahl der pro Minute gelaufenen Pfade betrachtet. Wurden im Tagesmittel mindestens zwei Pfade pro Minute vervollständigt, hatte der Proband das Trainingsziel erreicht. Zu Beginn des Trainings war die Effektivität aller Probanden deutlich geringer. Innerhalb von 5 bis 9 Trainingssitzungen (3 bis 5 Tage) gelang es 6 von

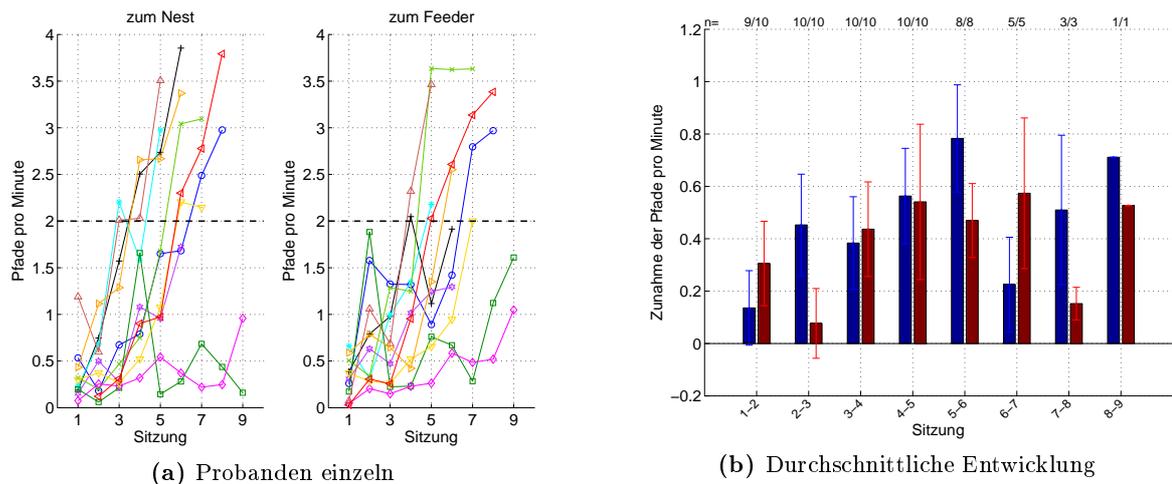


Abbildung 11: Entwicklung der pro Minute gelaufenen Pfade über die Trainingssitzungen. In **a** sind die Einzelwerte der Probanden dargestellt, **links** die Pfade zum Nest, **rechts** die zum Feeder. **b** gibt die mittlere Änderung (vgl. Gleichung (2), Seite 17) der pro Minute gelaufenen Pfade \pm Standardfehler an. n gibt im 1. Wert die Anzahl der bei den Pfaden zum Nest beteiligten Probanden an (blaue Balken), im 2. die bei den Pfaden zum Feeder (rote Balken).

11 Probanden, das Trainingsziel zu erreichen (vgl. Abbildung 11a, Seite 25). Drei weitere Probanden (AN19 - schwarzes Pluszeichen, SM22 - rosa Raute und TK23 - oranges Dreieck nach vorne) erfüllten die Bedingung während der ersten Pfade im Suchdurchgang (vgl. Kapitel 8, Seite 81). Ein Proband (IW25 - grüne Quadrate) erreichte in der neunten Sitzungen eine Effektivität von 1.6 Pfaden pro Minuten auf dem Weg zum Feeder (sank bei der Suche auf 0.3) und 0.2 auf dem Rückweg (bei der Suche ebenfalls 0.3). Da er die Aufgabe nicht erlernt hatte, wird er im Folgenden, so nicht anders beschrieben, aus allen Lernkurven und Tests ausgeschlossen. Dies führte dazu, dass für die neunte Sitzung immer nur die Daten eines Probanden zur Verfügung standen. Der jeweils resultierende Wert kann also nicht als sehr verlässlich angesehen werden. EH23 (lila Sternchen) erreichte das Ziel ebenfalls nicht. Seine Leistung war jedoch im Gegensatz zu der von IW25 seit Beginn des Versuches kontinuierlich gestiegen, so dass ein gewisser Lernerfolg anzunehmen ist.

Die Anzahl der pro Minute gelaufenen Pfade nahm im Mittel kontinuierlich zu (die Balken in Abbildung 11b (Seite 25) sind durchweg positiv). Diese "Leistungssteigerung" von der ersten zur letzten Trainingssitzung ist statistisch hoch signifikant, der Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon ergab für beide Laufrichtungen $p < 0.005$.

3.2.5 Pfadlänge

Die Pfade wurden mit fortschreitendem Training erheblich kürzer. Während die Probanden in den ersten Trainingssitzungen weite Suchstrecken zurücklegten, bevor sie das jeweilige Ziel fanden, waren sie in späteren Sitzungen in der Lage, das Ziel viel direkter anzulaufen (vgl. Abbildung 12a, Seite 26). Der Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon ergab für beide Laufrichtungen signifikante Änderungen (p_{Hin} und $p_{\text{Rück}} < 0.005$). Dabei ist die Streckenverringerung bei den ersten Sitzungen besonders ausgeprägt (vgl. Abbildung 12b, Seite 26). Die starke Verkürzung zwischen den letzten beiden Sitzungen in Abbildung 12b kommt daher, dass der einzige Proband, der außer IW25 (grüne Quadrate), der bei allen gemeinsamen Auswertungen weggelassen wurde, an der neunten Sitzung teilgenommen hat (SM22 - rosa Raute), bei der allerletzten Sitzung eine deutliche Leistungssteigerung zeigte. Diese Steigerung hat sich bei den ersten Durchläufen der Suche weiter stark fortgesetzt (vgl. Kapitel 8, Seite 81).

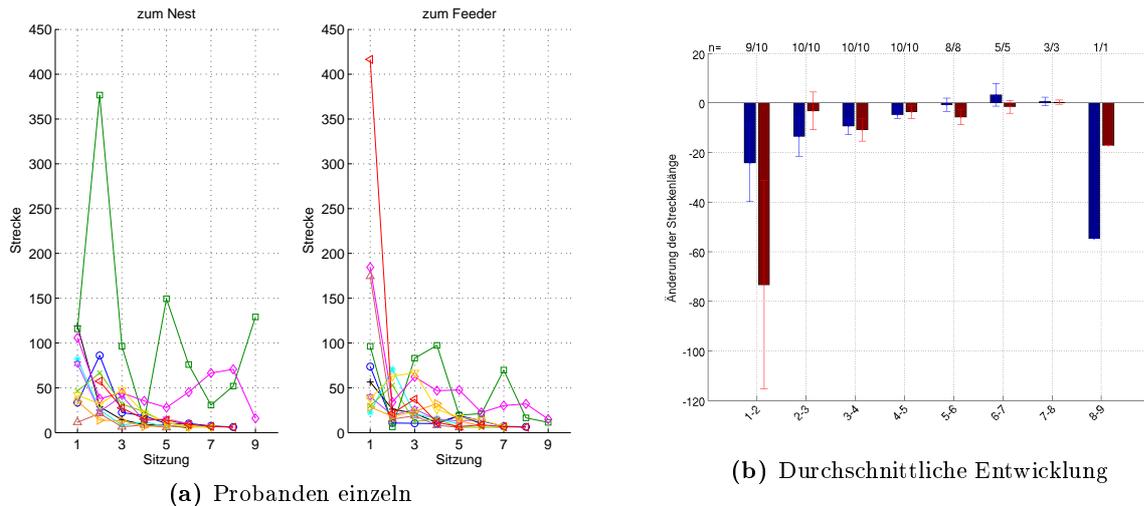


Abbildung 12: **a:** Entwicklung der Länge der Pfade der einzelnen Probanden über die Trainingstage. **Links** die Pfade zum Nest, **rechts** die zum Feeder. **b:** gemittelte Änderung (vgl. Gleichung (2), Seite 17) der Pfadlänge über die Trainingstage \pm Standardfehler. Die Pfade zum Nest sind in den blauen Balken zusammengefasst, die zum Feeder in den roten. Das angegebene n gibt die Anzahl der beteiligten Probanden, der 1. Wert bezieht sich auf die Pfade zum Nest, der 2. auf die zum Feeder.

3.2.6 Geradlinigkeit

Die Trajektorien wurden mit zunehmendem Training mit einer Ausnahme bei allen Probanden kürzer. Im Folgenden wird untersucht, ob dabei die Kurvigkeit abnahm, die Trajektorien also geradliniger wurden. Die Geradlinigkeit eines Pfadabschnittes zwischen zwei Punkten entspricht der auf englisch als "path efficiency" bezeichneten Effizienz des Streckenabschnittes. Sie wird als Quotient von der Entfernung der beiden Punkte und der dazwischen tatsächlich gelaufenen Strecke bestimmt (vgl. Abbildung 13):

$$\text{Geradlinigkeit} = \frac{\text{Distanz}}{\text{gelaufene Strecke}} \quad (3)$$

Eine Effizienz oder Geradlinigkeit von 1 bedeutet, dass die Trajektorie auf der die Eckpunkte verbindenden Geraden verläuft. Je größer die Abweichung von dieser Geraden ist, desto kleiner wird die Effizienz. Jedem Schritt entlang der Trajektorie wird ein solcher Wert zugeordnet, wozu jeweils die x -, y -Werte der Positionen fünf Messwerte vor und nach dem betrachteten Wert als Eckpunkte genommen werden (vgl. Abbildung 13). Der gesamten Trajektorie wird dann jeweils der Mittelwert ihrer Einzelwerte zugeordnet, einer Sitzung wiederum der Mittelwert ihrer Trajektorien.

Die Entwicklung der Geradlinigkeit der Trajektorien der einzelnen Probanden ist in Abbildung 14a auf Seite 27 dargestellt. Nicht bei allen Probanden wurden die Trajektorien mit der Zeit geradliniger. Bei einem Proband (IW25 - grüne Quadrate) wurden die Rückwege zum Nest sogar kurviger, bei zwei weiteren (SM22 - rosa Raute, SN23 - braunes Dreieck nach oben) war die Geradlinigkeit der Rückwege im ersten und letzten Training gleich. Einer der beiden (SN23) war von Anfang an ziemlich geradlinig gelaufen. Eine Betrachtung der durchschnittlichen Änderung der Geradlinigkeit (Abbildung 14b, Seite 27) zeigt, dass sie (mit Ausnahme der Hinwege der 8. Sitzung) immer leicht zunimmt. Der stärkste Zuwachs ist zwischen der 8. und 9. Sitzung zu sehen, für deren Berechnung nur ein Proband (SM22) zur Verfügung stand. Die Zunahme der Geradlinigkeit ist in beiden Laufrichtungen signifikant (Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon: $p_{\text{Hin}} < 0.005$, $p_{\text{Rück}} < 0.05$).

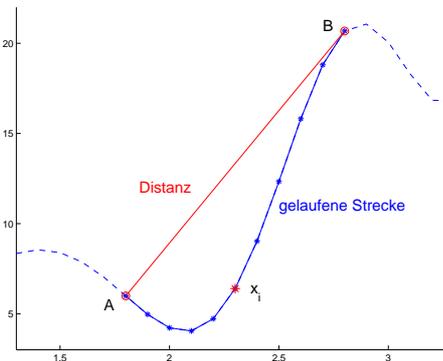


Abbildung 13: Bestimmung der Geradlinigkeit eines Pfadabschnittes. Die x_i zugeordnete Geradlinigkeit errechnet sich als Quotient von Distanz und gelaufener Strecke.

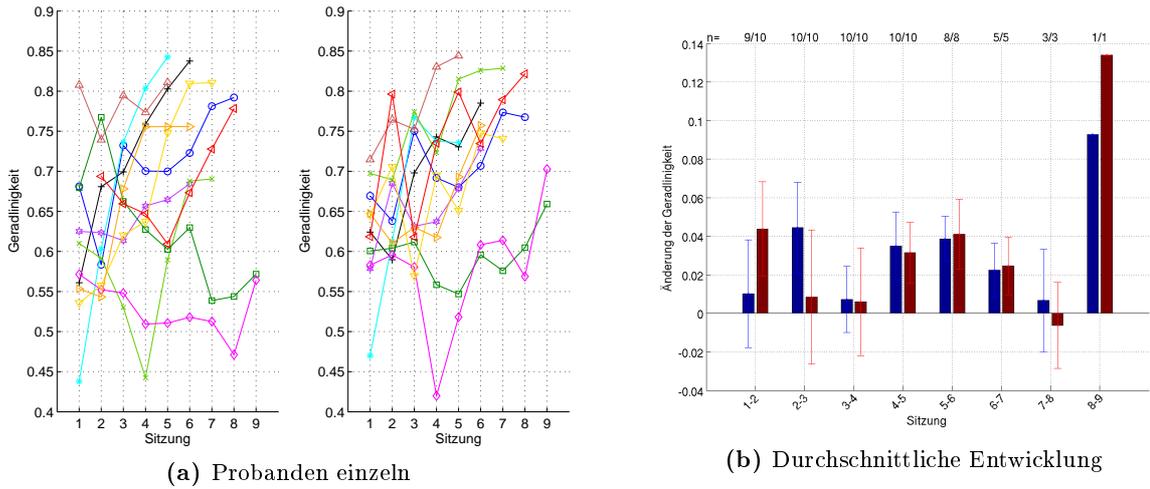


Abbildung 14: Geradlinigkeit der Trajektorien. Eine schnurgerade Trajektorie erhält die Geradlinigkeit 1, mit zunehmender Kurvigkeit geht die Geradlinigkeit gegen 0. Die im Training maximal erreichte mittlere Geradlinigkeit eines Pfades lag bei knapp 0.9. **a:** Jeweils über alle Pfade einer Sitzung gemittelte Geradlinigkeit der einzelnen Probanden bei Trajektorien zum Nest (links) und zum Feeder (rechts). **b:** Mittlere Änderung (vgl. Gleichung (2), Seite 17) der Geradlinigkeit der Trajektorien \pm Standardfehler. Die blauen Balken beschreiben die Trajektorien zum Nest (1. Wert von n), die roten die zum Feeder (2. Wert von n).

3.2.7 Geschwindigkeit

Die mittlere Gesamtgeschwindigkeit berechnet sich aus der Zeit, die für den ganzen Pfad benötigt wurde (also einschließlich möglicher Pausen) und der Strecke, die zurückgelegt wurde:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Strecke}}{\text{Zeit}} \quad (4)$$

Sie nahm während des Trainings zu (vgl. Abbildung 15b, Seite 28). Die Geschwindigkeit hängt zum einen von der Laufgeschwindigkeit, zum anderen von Anzahl und Dauer der eingelegten Pausen ab. Die Laufgeschwindigkeit lässt sich über die Schrittlänge durch die Auslenkung des Joypad-Hebels variieren. Dabei ist nur die Schrittlänge, nicht die Schrittfrequenz regelbar. Die Schrittlänge wird aus den Daten als euklidischer Abstand D_i zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Messpunkten (jeweils als x_i, y_i) bestimmt:

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (5)$$

mit $i \in [2, \text{Messwertanzahl } n]$.

Dem Pfad wird wiederum der Mittelwert der Einzelwerte zugeordnet:

$$D_{Pfad} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (6)$$

Die Schrittlänge nahm während des Trainings signifikant zu (vgl. Abbildung 16, Seite 29), der Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon ergab $p_{\text{Hin}} < 0.005$ und $p_{\text{Rück}} < 0.01$. Dies zeigt sich auch darin, dass in Abbildung 16b die Änderung der Schrittlänge bei nahezu jedem Training positiv ist. Betrachtet man die Einzelwerte der Probanden in Abbildung 16a, so steigt die Schrittlänge mit drei Ausnahmen überall an. Ausnahme 1 ist AN19 (schwarzes Pluszeichen). Dieser Proband lief von Anfang an relativ zügig, so dass eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit durch die künstlich vorgegebene Begrenzung derselben kaum möglich war. Ausnahme 2 bildet SP20 (gelbes Dreieck nach unten). Hier lässt sich der zögernde Anstieg der Laufgeschwindigkeit nicht durch einen derartigen "Ceilingeffekt" erklären. Dieser Proband ist durchgehend relativ langsam gelaufen und lief, obwohl die gewählte Route mit zunehmendem Training kürzer wurde (vgl. Abbildung 12a, Seite 26), kaum schneller. Die letzte Ausnahme war

IW25 (grünes Quadrat). Hier war mit fortschreitendem Training besonders auf dem Rückweg sogar eine deutliche Verlangsamung zu beobachten.

Es besteht keine Korrelation zwischen der Streckenlänge (als Maß der Routensicherheit) und der gewählten Laufgeschwindigkeit. Der Korrelationskoeffizient (KK) beträgt bei Betrachtung der sitzungsweise gemittelten Daten -0.14 (vgl. Abbildung 17a, Seite 29) und -0.28 , wenn jeder Pfad für sich bewertet wird. Genausowenig besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der zu Beginn des Trainings gewählten Laufgeschwindigkeit und der vom Probanden im Vorfeld angegebenen bisherigen Erfahrung mit Computerspielen ($KK=0.25$, vgl. Abbildung 17b) oder Joysticks ($KK=0.27$). So gaben zwei der Probanden (AS19, EH23) an, eine sehr große Erfahrung mit 3D-Computerspielen zu haben (9 auf einer Skala von 1 bis 9). In Hinsicht auf die Laufgeschwindigkeit unterschied sich das Verhalten der beiden Probanden jedoch deutlich. Während AN19 von Anfang an sehr schnell lief (die mittlere Schrittlänge betrug bei der ersten Sitzung mehr als 0.09 EE; bei maximal 0.108 EE), begann EH23 mit Schrittlängen von ungefähr 0.07 EE, und steigerte die Laufgeschwindigkeit in den folgenden Sitzungen. Die beiden Probanden mit der geringsten Spielerfahrung (SP20 und TK23, beide gaben 1 an) begannen mit mittleren bis hohen Schrittlängen (0.06 bis 0.08). Während TK23 mit dem Training immer schneller wurde, behielt SP20 seine Anfangsgeschwindigkeit ungefähr bei. Der Proband mit der niedrigsten Schrittlänge (SM22) hatte eine Spielerfahrung von 2 angegeben.

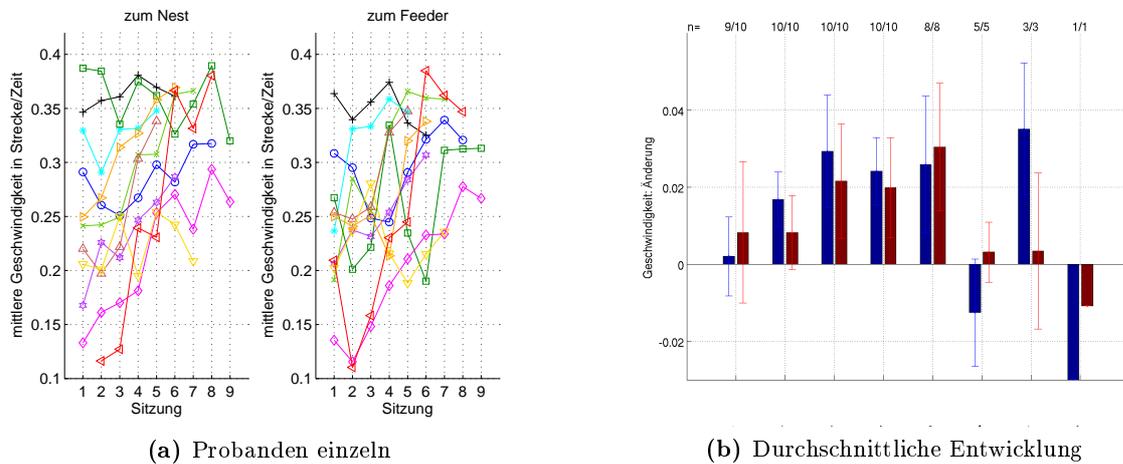
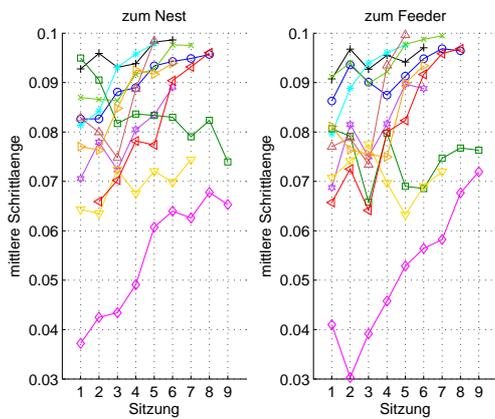


Abbildung 15: a: Mittlere Geschwindigkeit der Probanden. **Links** zum Nest, **rechts** zum Feeder. b: Mittlere Änderung (vgl. Gleichung (2), Seite 17) der Geschwindigkeit \pm Standardfehler. Die blauen Balken beschreiben die Trajektorien zum Nest (1. Wert von n), die roten die zum Feeder (2. Wert von n).

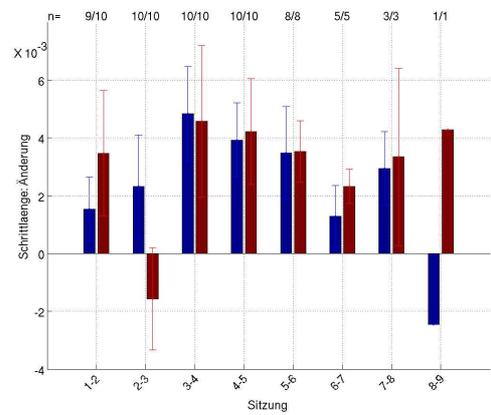
Natürlich hat auch die Zeit, die der Proband im Stehen verbringt (beispielsweise um sich zu orientieren) einen Einfluss auf die Gesamtgeschwindigkeit. Der prozentuale Anteil dieser im Stehen verbrachten Zeit an der für den Pfad benötigten Gesamtzeit

$$\text{Anteil der Standzeit} = \frac{\text{Standzeit}}{\text{Pfaddauer}} * 100 \quad (7)$$

nahm während des Trainings bei sieben der elf Probanden ab (vgl. Abbildung 18, Seite 30). Im Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon ergibt sich für keine Laufrichtung eine signifikante Änderung: p_{Hin} und $p_{\text{Rück}} > 0.05$. Diese nicht signifikante Änderung des Anteils ist, wie in Abbildung 18b (Seite 30) dargestellt, nicht kontinuierlich. Bei der zweiten Sitzung wurde anteilig mehr Zeit im Stehen verbracht als bei der ersten. In den folgenden Sitzungen dagegen nahm der Standanteil wieder ab. Zwischen Sitzung 6 und 7 gab es wiederum einen Anstieg, hier blieben drei der verbliebenen fünf Probanden tatsächlich länger stehen (gerechnet ohne IW25 - grüne Quadrate. Der blieb weniger stehen, wurde jedoch bei allen Gesamt-Betrachtungen weggelassen). Auch zur letzten Sitzung nimmt der Anteil im Mittel wieder zu - allerdings ist hier nur noch ein Proband (SM22 - rosa Rauten) beteiligt, so dass dieser Wert als sehr unzuverlässig angesehen werden muss.



(a) Probanden einzeln

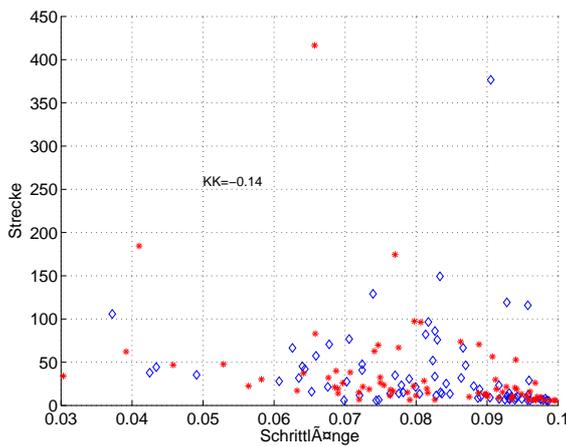


(b) Durchschnittliche Entwicklung

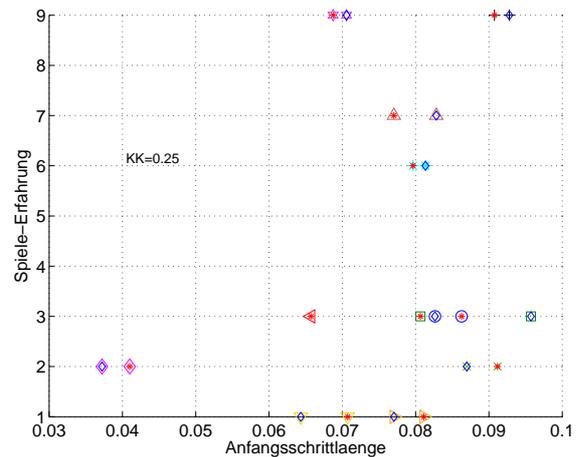
Abbildung 16: a: Mittlere Schrittlängen der einzelnen Probanden gegen die Sitzungsnummer. **Links** sind die Pfade zum Nest zusammengefasst, **rechts** die zum Feeder. **b:** Mittlere Änderung (vgl. Gleichung (2), Seite 17) der Schrittlänge \pm Standardfehler. Eine Zunahme stellt sich als positiver Wert dar, eine Verringerung als negativer.

Die blauen Balken beschreiben die Trajektorien zum Nest (1. Wert des oben angegebenen n), die roten die zum Feeder (2. Wert von n).

Die maximale Länge eines Schrittes beträgt 0.108 EE.



(a)



(b)

Abbildung 17: a: Zusammenhang von Streckenlänge und Schrittlänge. **b:** Zusammenhang von Schrittlänge und Erfahrung mit 3D-Spielen.

Die Daten der Hinwege zum Feeder sind jeweils als rote Asterisken dargestellt, die der Rückwege zum Nest als blaue Rauten. Die umgebenden Marker in **b** entsprechen der Probandencodierung.

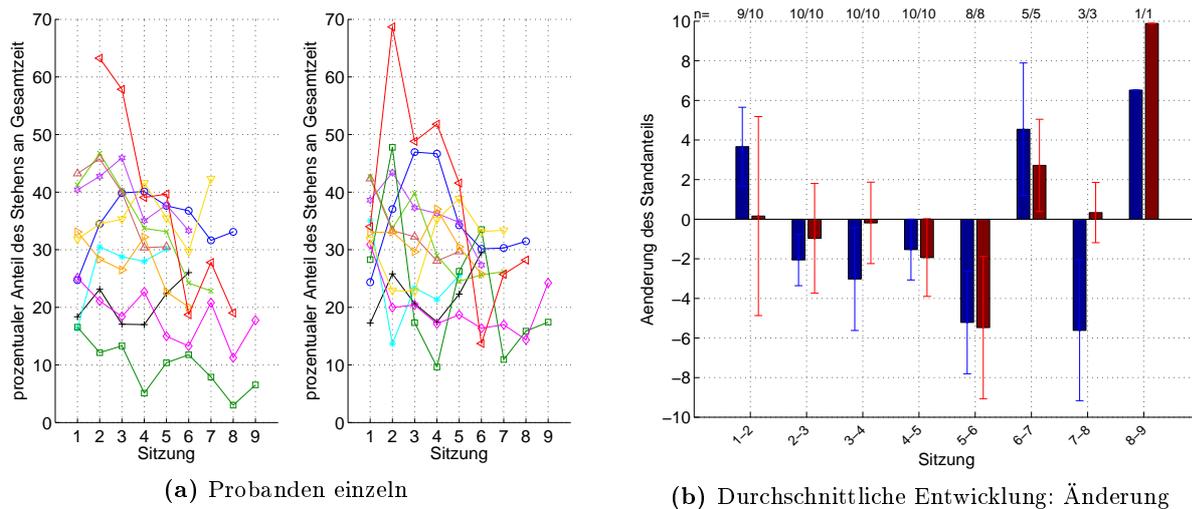


Abbildung 18: Zeitlicher Anteil des Stehenbleibens. **a:** Einzelwerte der Probanden: prozentualer Anteil der Gesamtzeit, den die Probanden im Stehen verbracht haben. **Links** die Pfade zum Nest, **rechts** die zum Feeder. **b:** mittlere Änderung des Standanteils \pm Standardfehler.

In blau sind die Trajektorien zum Nest zusammengefasst (1. Wert von n), in rot die zum Feeder (2. Wert von n).

Die Anzahl der pro Pfad eingelegten Pausen dagegen nahm in beiden Richtungen signifikant ab (Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon: $p_{\text{Hin}}, p_{\text{Rück}} < 0.005$; vgl. Abbildung 19a, Seite 31). Um kurze, steuerungsbedingte Stopps auszuschließen, wie sie beispielsweise bei einer "Schubumkehr" (von Vorwärtslaufen auf Rückwärtslaufen umstellen oder andersherum) zwangsläufig auftreten, wurden hierbei nur Pausen mit einer Dauer von mindestens einer Sekunde (5 Datenpunkte) berücksichtigt. Da die Pfade mit zunehmendem Training immer kürzer wurden, könnte dieser Effekt ein reiner Streckeneffekt sein, etwa wenn alle 100 Schritte eine Pause eingelegt worden wäre. Tatsächlich findet sich bei der Anzahl der pro Strecke eingelegten Pause nur noch für die Strecken zum Feeder eine signifikante Änderung mit dem Training (Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon: $p_{\text{Hin}} < 0.005$, $p_{\text{Rück}} > 0.05$, vgl. Abbildung 20, Seite 32).

Die Länge der eingelegten Pausen (Dauer über 1 Sekunde) nahm mit dem Training nicht signifikant ab ($p_{\text{Hin}}, p_{\text{Rück}} > 0.05$). Zudem gab es auch keine deutliche Veränderung der Verteilung der Pausendauern durch das Training. In Abbildung 19d (Seite 31) ist die über alle Probanden (wie immer unter Ausschluss von IW25) gemittelte Entwicklung der Häufigkeiten der Pausendauern dargestellt. Eine rein visuelle (und recht grobe) Betrachtung ergibt, dass die Anzahl aller Pausen, gleich welcher Länge, mit zunehmendem Training abnimmt. Die Probanden bleiben also seltener stehen, aber es gibt nach wie vor lange wie kurze Pausen und die mittlere Pausendauer bleibt unverändert.

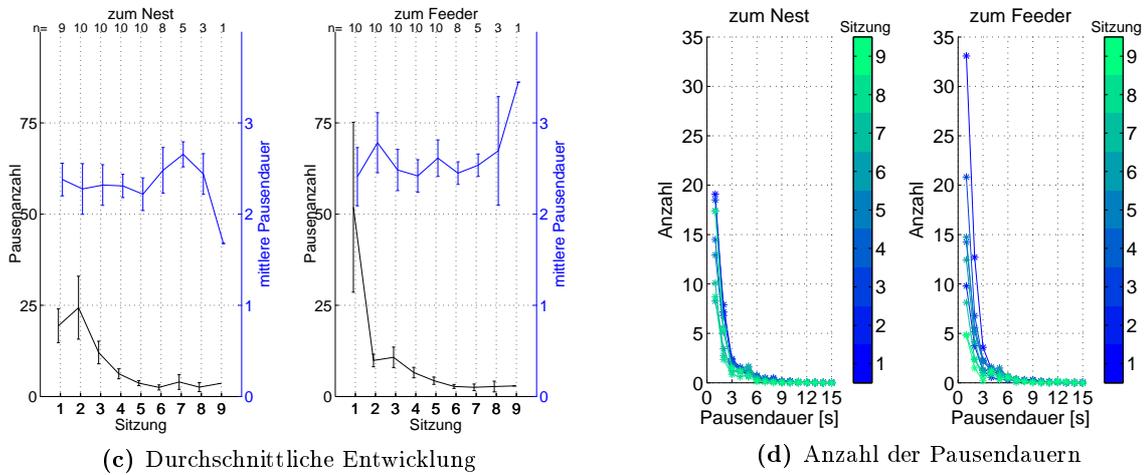
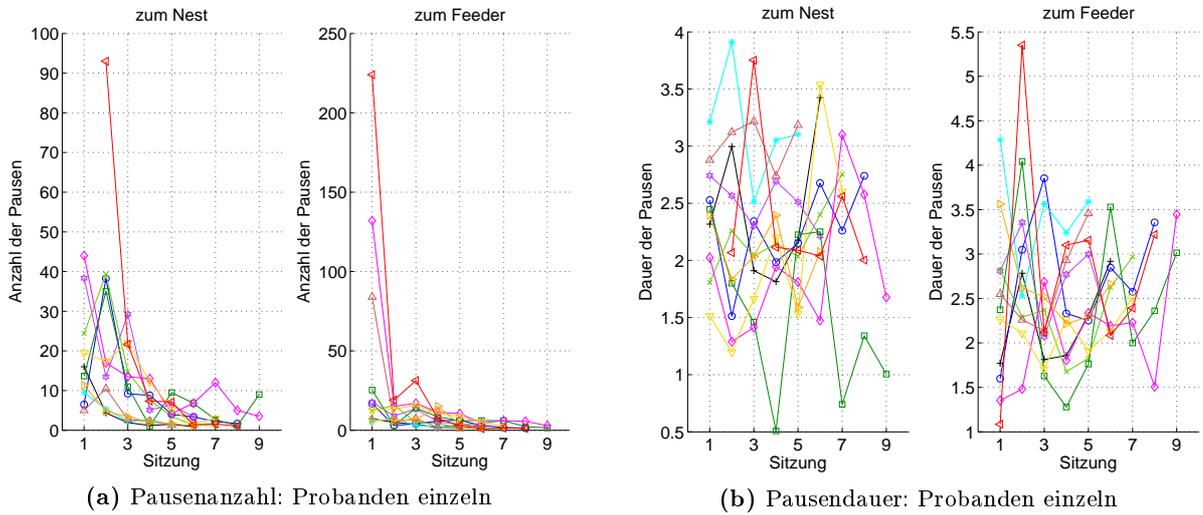


Abbildung 19: Anzahl und Dauer der Pausen. **a:** Einzelwerte der Probanden: mittlere Anzahl der eingelegten Pausen pro Pfad. **b:** Einzelwerte der Probanden: mittlere Dauer der eingelegten Pausen. **c:** über alle Probanden gemittelte Werte. Die blaue Linie gibt die mittlere Pausendauer, die schwarze die mittlere Anzahl der Pausen pro Pfad an, jeweils \pm Standardfehler. n gibt die Anzahl der beteiligten Probanden. **d:** Wie oft kommt welche Pausendauer vor? Über alle Probanden gemittelt. Die Pausendauer ist in Sekunden angegeben. Die Sitzungsnummer ist farbcodiert - je grüner, desto höher ist die Nummer, siehe Farbbalken. In allen vier Unterabbildungen sind jeweils, wie im Titel angegeben, für die **linke** Teilabbildung alle Pfade zum Nest gemittelt, für die **rechte** alle Pfade zum Feeder.

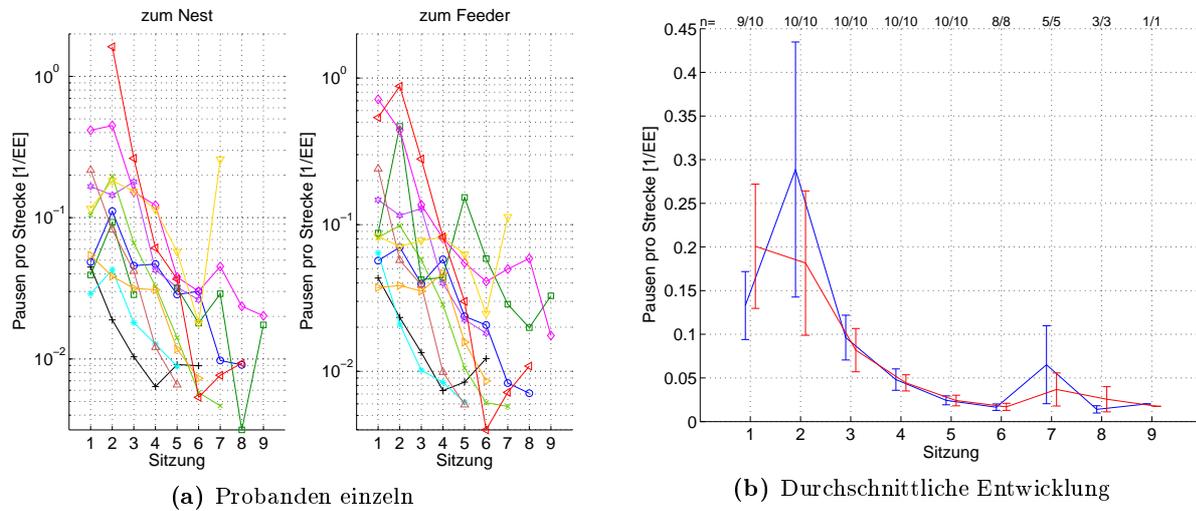


Abbildung 20: a: Einzelwerte der Probanden: Wieviele Pausen werden pro zurückgelegter Strecke eingelegt? Die Strecke ist in programminternen Entfernungseinheiten (EE) gegeben. b: Über alle Probanden gemittelte Werte. Die blaue Linie gibt die Anzahl der Pausen pro Strecke auf dem Weg zum Nest an, der 1. Wert von n die zugehörige Probandenanzahl, die rote Linie die auf dem Weg zum Feeder (2. Wert von n); jeweils \pm Standardfehler.

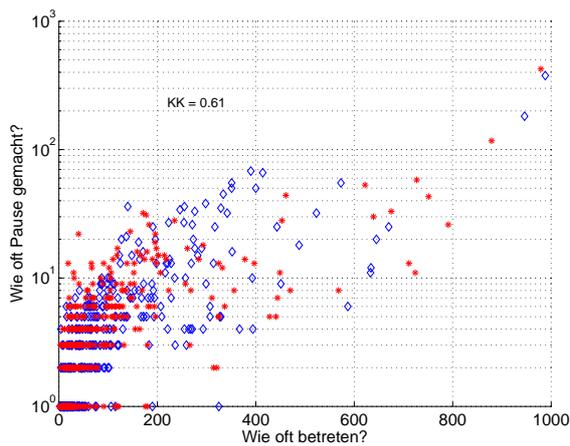


Abbildung 21: Betretungshäufigkeit der Dreiecke gegen die Anzahl der Pausen, die dort eingelegt wurden. Beide Laufrichtungen wurden getrennt betrachtet. Dreiecke, die auf dem Weg zum Feeder betreten wurden, sind in rot dargestellt, die zum Nest in blau.

3.2.8 Welche Streckenabschnitte etablieren sich wann?

Es soll untersucht werden, in welcher Reihenfolge verschiedene Bereiche der Route gelernt werden. Wird die ganze Route gleichzeitig etabliert? Wird erst eine Startregion "verfestigt", deren Umfang dann immer weiter bis zum Ziel wächst? Beginnt der Lernvorgang vielleicht am Ziel? Um diese Fragen zu beantworten, wurden um das jeweilige Ziel (Nest oder Feeder) konzentrische Kreise gelegt (vgl. Abbildung 22). Der Abstand zwischen den Kreisen beträgt ungefähr eine Entfernungseinheit ($\delta_{Radius} = 1.1 EE$). Die Trajektorien wurden in Abschnitte unterteilt, die den einzelnen Kreisen zugeordnet wurden: Der Trajektorienabschnitt, der einem Kreis zugeordnet wird, beginnt mit dessen Erstüberschreitung und endet an der Stelle, an welcher der eine Stufe kleinere Kreis das erste Mal überschritten wird. Der betrachtete Parameter beschreibt, wie effizient der Proband sich dem Kreismittelpunkt (und damit dem Zielpunkt) nähert. Er errechnet sich analog der in Abschnitt 3.2.6 (Seite 26) beschriebenen Geradlinigkeit. Allerdings wird diesmal nicht die Luftliniendistanz zwischen zwei tatsächlich betretenen Punkten als Referenz ("ideale Strecke") verwendet, sondern der Abstand der Kreise, also die minimale Distanz, die zwischen ihnen zurückgelegt werden muss. Der Parameter errechnet sich also als Quotient von dem Abstand der Kreise und der dazwischen tatsächlich zurückgelegten Strecke. Hat sich ein Streckenabschnitt etabliert, so ist die Effizienz in jedem Durchgang (und damit auch in aufeinanderfolgenden Sitzungen) ähnlich. Daher wurde als Maß für die Unsicherheit eines Probanden innerhalb eines Kreises die Standardabweichung dieser Effizienz über alle Sitzungen bestimmt. Je später ein Abschnitt gelernt wurde, desto mehr Werte weichen vom jeweiligen Mittelwert ab, wohingegen bei einem früh etablierten Abschnitt die meisten Werte nahe beieinander liegen, die Standardabweichung also klein ist.

Es wurden jeweils die Sitzungsmittelwerte verwendet, statt auf die einzelnen Pfade zurückzugreifen, da andernfalls die besseren, und einander vergleichsweise ähnlichen, Pfade gegen Ende des Trainings durch ihre viel größere Anzahl klar überbewertet würden. Das Maß berücksichtigt nicht, wo genau die Trajektorie den Kreis durchkreuzt. Es bietet also keinen Vergleich der Routenverläufe, sondern dient als Anzeiger, wie direkt der Proband durch den betrachteten Kreis auf dessen Mittelpunkt zu navigierte. Dabei werden auch die Hindernisse, die der Proband ja in jedem Fall umgehen muss, nicht berücksichtigt.

Die resultierenden Effizienzen sind in Abbildung 23 (Seite 34) dargestellt. Die Standardabweichungen steigen vom Startpunkt zum Ziel hin an. Dieser Trend ist hochsignifikant (Pages L-Test, $\alpha < 0.001$). Allerdings ist der Anstieg nicht monoton, was die über alle Probanden gemittelte Standardabweichung in Abbildung 23c (Seite 34) verdeutlicht. Im ersten Bereich nahe dem Startpunkt nimmt die Standardabweichung zuerst ab, um dann anzusteigen und nahe am Zielpunkt wieder abzufallen. Im Einzelnen betrachtet ergibt sich bei 4 Probanden bei den Pfaden zum Feeder und bei 8 Probanden bei den Pfaden zum Nest im letzten Kreis eine geringere Standardabweichung als im Mittelteil.

Die Routen wurden demzufolge vom Startpunkt ab gelernt, wobei der allererste Teil der Trajektorie leicht variierte. In der Nähe des Zieles zeigten die Probanden wiederum eine größere Zielstrebigkeit als im Mittelteil, die Schwankungen sind jedoch größer als um den Startpunkt.

3.2.9 Vergleich von Hin- und Rückweg

Genügt es, den Weg in einer Richtung zu lernen, um ihn in die andere ebenfalls zu finden, oder werden die Routen für den Hin- und Rückweg separat gelernt? Um diese Frage anzugehen, wurde betrachtet, wann sich für welche Richtung eine Route etabliert. Sollte die Strecke richtungsinvariant erlernt werden, ist zu erwarten, dass sich für beide Richtungen gleichzeitig dieselbe Route entwickelt. Bei drei Probanden etablierten sich für den Hin- und Rückweg zeitgleich sehr ähnliche Routen. Einer der drei verfügte zuvor bereits über eine Route zum Feeder, die während der Stabilisierung des Rückweges

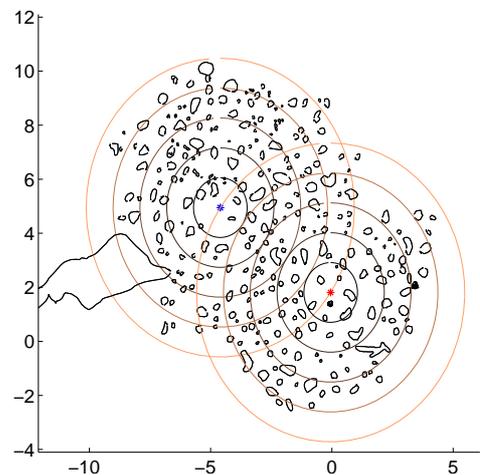
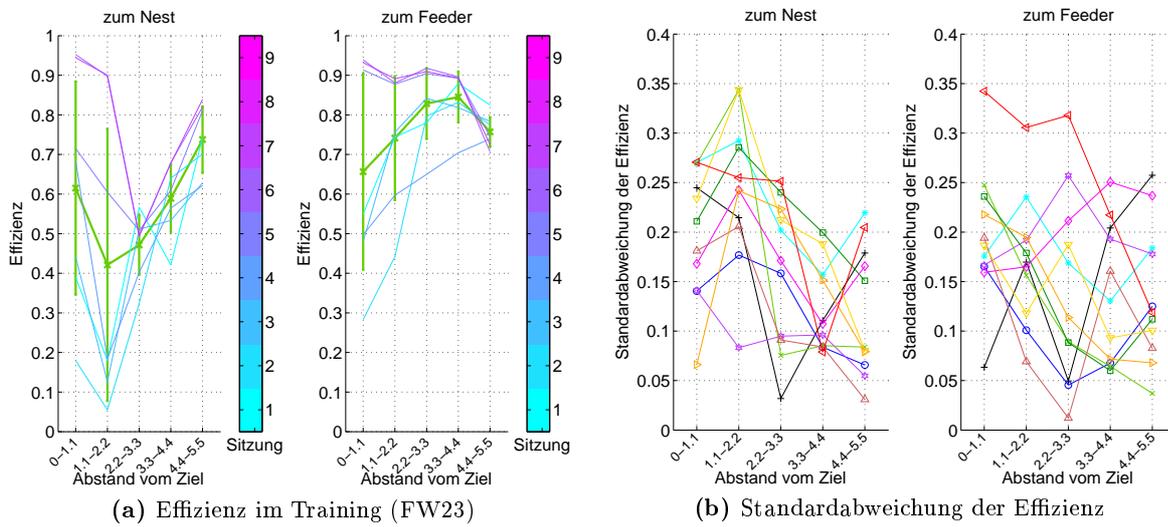


Abbildung 22: Karte der Umgebung mit den für die Auswertung der Effizienz eines Streckenabschnittes verwendeten Kreisen.



(a) Effizienz im Training (FW23)

(b) Standardabweichung der Effizienz

(c) mittlere Standardabweichung

Abbildung 23: Effizienz der Routen in Abhängigkeit von der Distanz zum jeweiligen Ziel. Die Pfade wurden mit Hilfe konzentrischer Kreise ($\delta_{Radius} = 1.1$ EE) in Abschnitte unterteilt, für welche dann jeweils die Effizienz berechnet wurde. **a:** Beispiel für die Entwicklung der Pfadefizienz der einzelnen Routenabschnitte während des Trainings (FW23). Die zunächst für jede Trajektorie einzeln ermittelten Effizienzen wurden über alle Pfade einer Sitzung gemittelt, so dass pro Sitzung eine mittlere Effizienz-Linie gebildet wurde. Die Standardabweichung dieser Effizienz-Linien (sie ist für FW23 in **a** als Fehlerbalken der grünen Linie eingetragen) sind in **b** für alle Probanden gezeigt und für **c** über alle Probanden, außer IW25, gemittelt dargestellt (\pm Standardfehler).

deutlich variabler wurde und so letztlich wie der Rückweg aussah.

Werden die Routen unabhängig voneinander gelernt, ist zu erwarten, dass sich unterschiedliche Routen etablieren, was bei sieben der elf Probanden der Fall war. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 26 (Seite 38) gezeigt. Allerdings kam es vor, dass sich für eine Richtung eine Route etablierte, welche später, unter Umständen ganz bewußt, durch die in der anderen Richtung genutzten Route ersetzt wurde. In diesem Fall wurde die Route erst in der einen, dann in der anderen Richtung verwendet. Ein derartiges Übertragen kam drei Mal vor und war in jedem Fall von anfänglichen Fehlern begleitet. Ein Beispiel dafür bieten die letzten beiden Trainingssitzungen von BG27. Sie sind in Abbildung 27 (Seite 38) dargestellt. BG27 folgte bei der vierten Trainingssitzung bei den ersten elf Durchgängen dem längeren, aber sicher beherrschten Rückweg über die große randständige Landmarke, um dann bis zum Ende der Sitzung (weitere sechs Durchgänge) zu versuchen, den Rückweg an die Route des Hinwegs anzupassen. Allerdings verlor er die Route immer wieder. Vier der Trajektorien während der Umstellung sind in Abbildung 28 (Seite 38) dargestellt. Erst bei der folgenden Sitzung, welche nach einer fünfminütigen Pause am selben Tag stattfand, konnte er der Route folgen. Bereits während der Umstellung sagte er, er versuche, jetzt in beide Richtungen gleich zu laufen, das Übertragen erfolgte in diesem Fall also bewußt.

3.2.10 An was orientieren sich die Probanden? Auswertung der mündlichen Angaben.

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die Antworten der Probanden auf die Frage, an was sie sich orientierten, sowie die spontanen Kommentare, die während des Trainings gemacht wurden, gegeben werden.

Die Probanden nannten sehr verschiedene Informationsquellen. Außer den Hindernissen und den unterschiedlich gefärbten Säulen ("globale Landmarken") wurden Wolken und Bäume des Hintergrundes und die "Schatten" an den Hindernissen (zur Verstärkung des räumlichen Eindruckes wurde die Umgebung aus einer Seite beleuchtet) genannt. Die farbigen Säulen wurden nicht nur als Richtung genutzt. Über ihre Höhe und die Lage relativ zu den Hindernissen wurden auch Orte definiert (beispielsweise "wie und wo stehen die globalen am Nest – mach's passend": EH23, 1. Tag, oder "der Feeder liegt hinter einer kleinen Mauer, so dass die rote Landmarke nicht sichtbar ist.": AN19, 1. Tag.). Die Hindernisse wurden sowohl einzeln ("das offene Hindernis", "die langgestreckte, dünne Wand", "die große am Rand", "der Böpsel da", ...), als auch in Kombination mit anderen genutzt ("Tunnel", "Platz", "zwischen DEN BEIDEN da durch", ...). Dass einzelne, individuell erkennbare Landmarken bei der Navigation in dieser Umgebung eine große Rolle spielten, läßt sich auch in Abbildung 28 (Seite 39) erkennen. Eine weitere wichtige Information, die von den Hindernissen abhing, war die Entfernung vom "Rand" der Umgebung. Auch diese Entfernung wurde mehrmals als Orientierungshilfe angegeben.

Viele Probanden gaben im Lauf des Trainings eine oder mehrere Beschreibungen der ganzen Route. Hier ein Beispiel von SN23 (3. Trainingstag): "Orientierung am Anfang an grün, an dem schmalen links vorbei, auf eine Wand zu, da rechts, am nächsten links, geradeaus bis zum Feeder. Dort drehen, auf den Kleinen zu, nach rechts gehen, von Wand links halten, auf den Schmalen zu, rechts vorbei, geradeaus". Er folgte zu diesem Zeitpunkt in beiden Richtungen der selben Route. In diesem Fall nutzte er auch dieselben Landmarken.

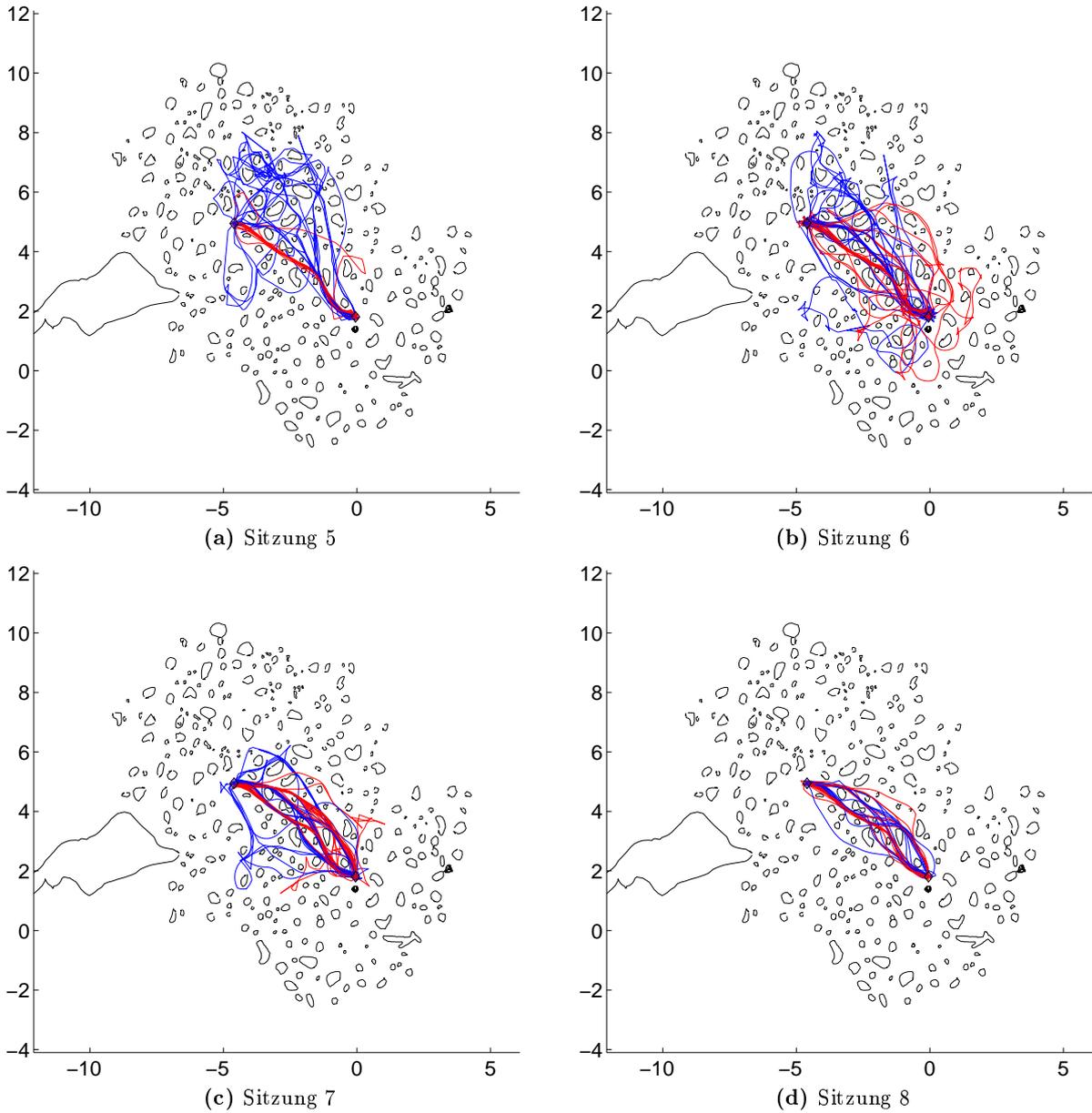


Abbildung 24: Zeitgleiches Erlernen von variablen Routen für den Hin- und Rückweg. Trajektorien von TS21. **a:** Sitzung 5. Es besteht eine konstante Route zum Feeder (rot), der Rückweg zum Nest hat sich noch nicht etabliert. **b:** Sitzung 6. Die meisten Hinwege erfolgen noch immer auf der festen Route. Der Proband verläuft sich allerdings wiederholt. Auch für den Rückweg werden manche Routen gehäuft genutzt. **c:** Sitzung 7. Es etablieren sich mehrere Routen für Hin- und Rückweg. **d:** Sitzung 8. Die Routen bleiben variabel, der Proband verläuft sich kaum noch. In allen Abbildungen Weg zum Feeder in rot, zum Nest in blau.

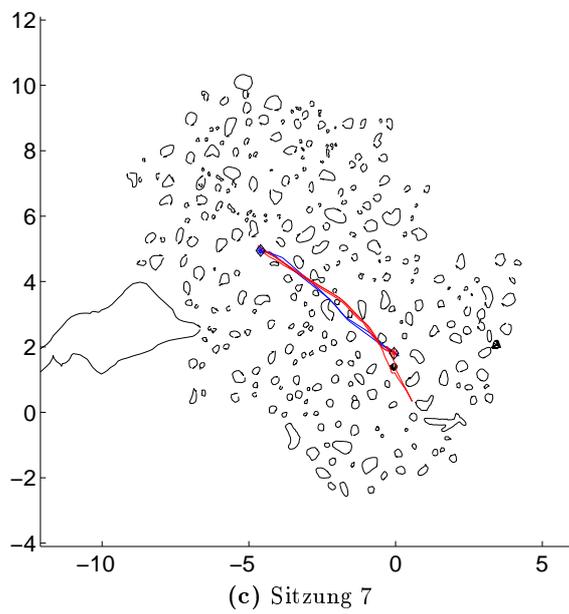
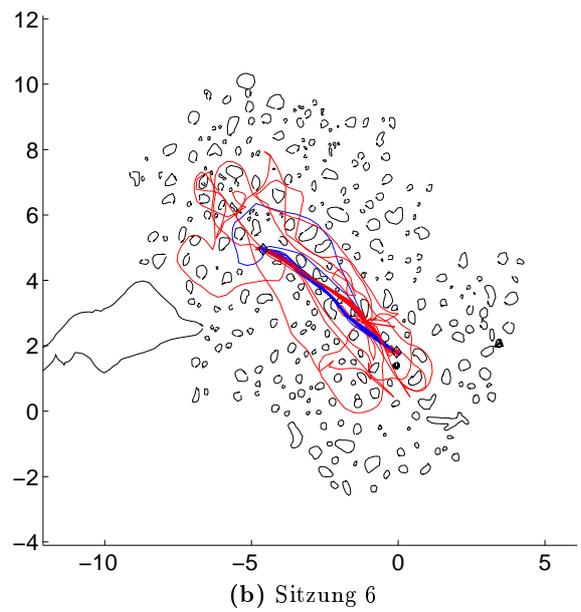
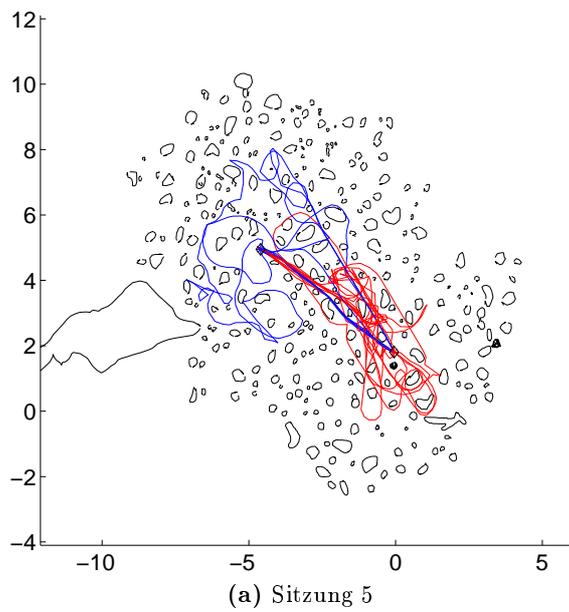


Abbildung 25: Zeitgleiches Erlernen von nahezu identischen Routen für den Hin- und Rückweg. Trajektorien von SP20. **a:** Sitzung 5. Die Routen für beide Laufrichtungen kommen vor. **b:** Sitzung 6. Von einigen Fehlläufen abgesehen, folgt der Proband den Routen einheitlich. Die beiden Richtungen unterscheiden sich nur durch die Seite, auf welcher der Proband an zwei hintereinander liegenden Hindernissen vorbeiläuft. **c:** Sitzung 7. Der Proband folgt den gefundenen Routen sehr konstant. In allen Abbildungen Weg zum Feeder in rot, zum Nest in blau.

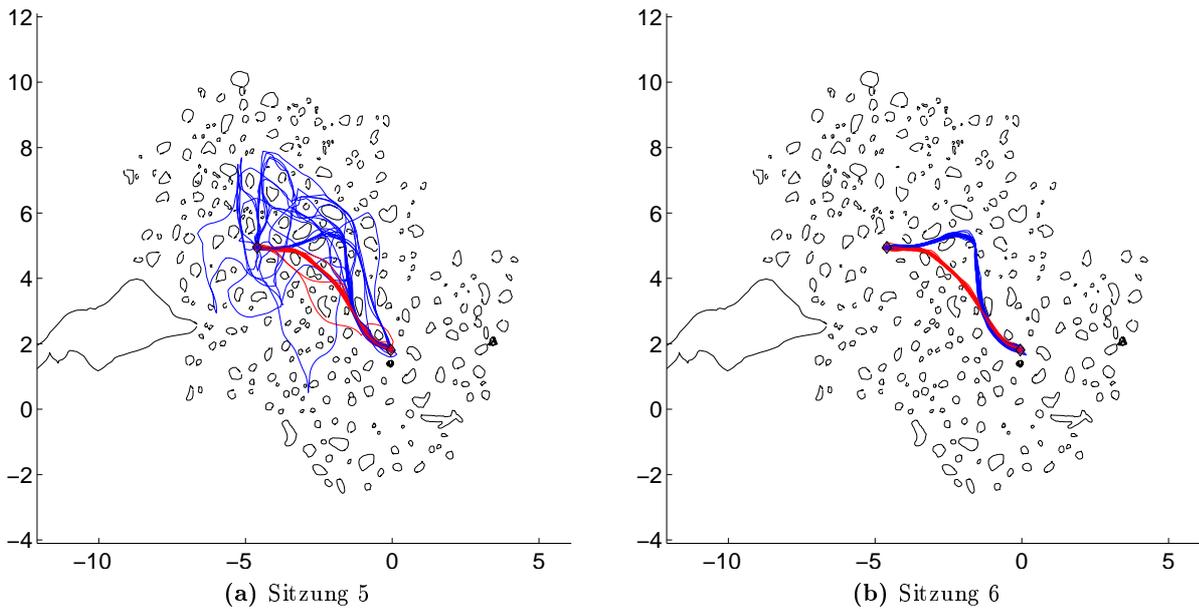


Abbildung 26: Beispiel für das getrennte Erlernen verschiedener Routen für die beiden Laufrichtungen. Trajektorien von FW23. **a:** Sitzung 5. Es existiert ein fester Weg für die Strecke zum Feeder (rot). Der Rückweg zum Nest (blau) scheint noch nicht festgelegt, doch die letztlich etablierte Route kommt bereits vor, sie wird gegen Ende dieser Trainingssitzung beinahe ausschließlich genutzt (im Bild nicht erkennbar). **b:** Sitzung 6. Die Routen haben sich für beide Richtungen fest etabliert. Der Proband weicht nicht mehr von ihnen ab.

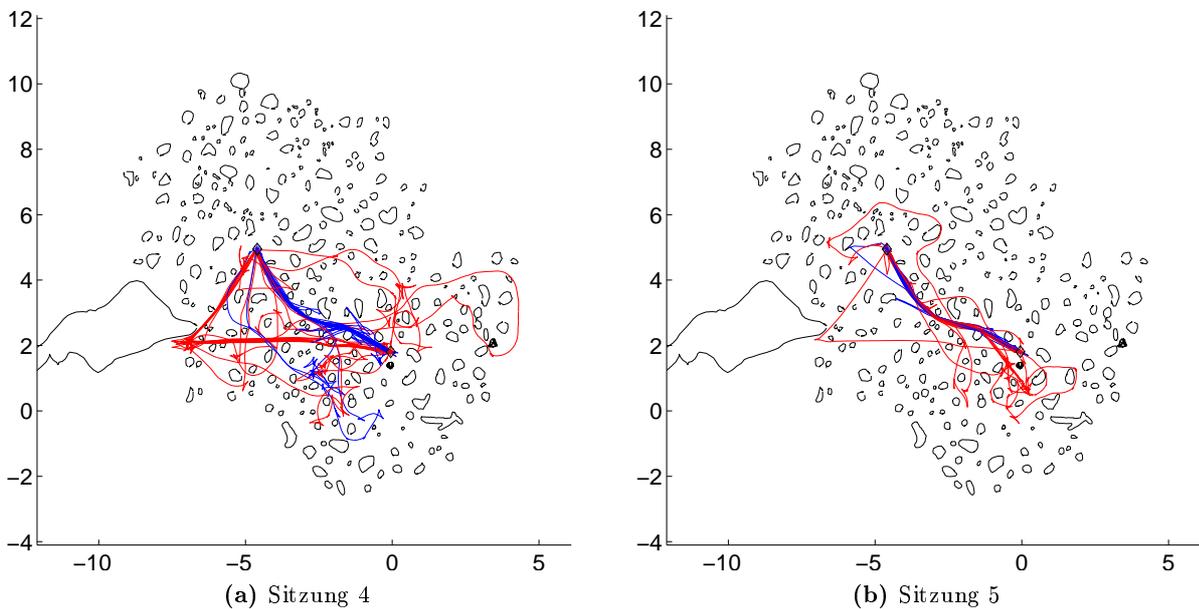


Abbildung 27: Beispiel für die Übertragung einer in einer Richtung erlernten Route auf die andere Richtung. Trajektorien von BG27. **a:** Sitzung 4. Es existieren etablierte Routen für beide Laufrichtungen. Die Wege zum Feeder (rot) machen einen weiten Umweg über die auffällig große randständige Landmarke. Die Wege zum Nest (blau) verlaufen relativ direkt. Die beiden Pfeile geben die jeweiligen Laufrichtungen an. **b:** Nach einmaligem Gebrauch des gewohnten Umweges über die randständige Landmarke stellt der Proband auch die Wege zum Feeder auf die bisher nur in der anderen Richtung genutzte "blaue" Route um. Dabei unterlaufen einige Fehler (verstreute dünne rote Trajektorien), doch letztlich folgt er in beiden Richtungen dem selben Weg.

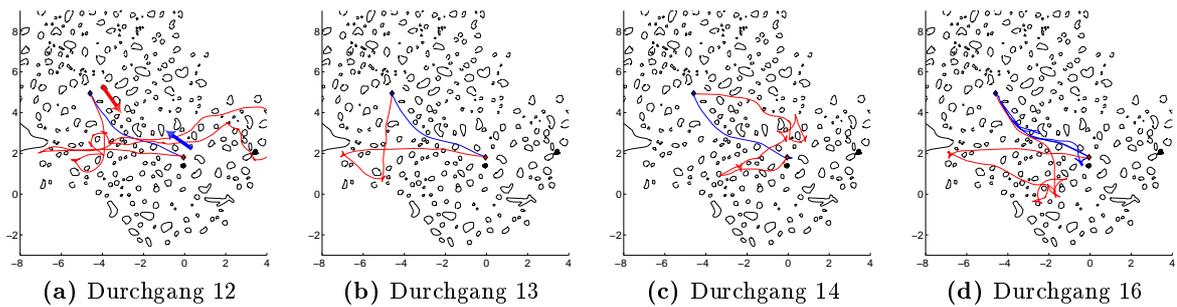


Abbildung 28: Versuche, den Hinweg (rot) dem Rückweg (blau) anzupassen. Dabei wird die randständige große Landmarke nach wie vor als Hilfe genutzt, um wieder zurück zu finden, nachdem man sich verlaufen hat. Der Proband startet jeweils links oben (blauer Asterisk). Man beachte die falschen Startrichtungen in **b** und **c**, sowie den lange völlig mit der blauen Haupttroute identischen Pfad in **d** - eine einzige Fehlentscheidung führt dann zum Verlust der Orientierung.

Es handelt sich um den 12. bis 14., sowie den 16. Durchgang der 4. Sitzung von BG27.

Den Aussagen der Probanden zufolge navigierten sie zu Beginn vor allem nach den globalen Landmarken. SN23 etwa gab an, seine speichenförmige Suche zu Beginn des Trainings an den globalen Landmarken auszurichten. Mit zunehmendem Training wurden mehr und mehr lokale Hindernisse zuverlässig wiedererkannt und für die Navigation herangezogen (wie SN23 oben beschrieb). Die globalen Landmarken dienten dann nur noch zur Überprüfung der groben Ausgangsrichtung, während die Feineinstellung bereits auf Hindernissen beruhte ("Feinjustierung darüber, zwischen welchen ich durch muss", TK23, Tag 3). Des weiteren spielten sie eine Rolle bei Neuorientierungen, nachdem ein Proband sich verlaufen hatte, sowie um abzuschätzen, in welchem "Viertel" (nur von SM22 so genannt, Tag 4) man sich befand.

Ein schönes Beispiel für eine Neuorientierung mit Hilfe der globalen Landmarken bietet AN19, der wiederholt die Hindernisumgebung verließ. Er beschrieb dies so: "Rauslaufen in Richtung rot, dann außen entlanglaufen, bis eine von den Säulen ein bisschen in die Gegend rutscht, eine, die blaue, in der Mitte steht und eine knapp außerhalb ist. Dann nach blau und ein bisschen rechts gehn. So geht's sicher zum Nest." In einigen Fällen hing der Erfolg einer Route an einzelnen Hindernissen. SM22 etwa sagte am 5. Trainingstag, dass er den Feeder immer dann fände, wenn er unterwegs ein bestimmtes Hindernis sähe, an dem er die Richtung korrigieren müsse. Wenn er es dagegen verpasste, blieb ihm nichts anderes übrig, als zum Nest zurück zu laufen und von dort neu zu starten.

3.2.11 Anmerkung zur Auswahl der statistischen Tests

Für alle im Training untersuchten Parameter würde sich Pages L-Test¹⁶ anbieten, ein verteilungsfreier Rangsummentest für verbundene Messreihen (mehr als zwei Messpunkte pro Proband), der überprüft, ob die Ränge einer vorausgesagten Reihenfolge folgen. Da die Probanden jedoch an 5 bis 9 Sitzungen teilgenommen haben und für diesen Test gleich viele Messpunkte pro Proband vorhanden sein müssen, müsste der Test 5 Mal durchgeführt werden, wobei jeweils Probanden unterschiedlicher Trainingszustände gemeinsam betrachtet würden: ein erster Test überprüft die ersten 5 Sitzungen aller Probanden, ein zweiter die ersten 6 Sitzungen aller Probanden, die mindestens 6 Sitzungen lang im Training waren und so fort. Außerdem soll hier in erster Linie gezeigt werden, ob der betrachtete Parameter durch den Lernvorgang verändert wird, die Probanden sich am Ende des Trainings also anders verhalten als zu Beginn. Dazu ist keine genauere Betrachtung der gesamten Reihenfolge aller Datenpunkte notwendig. Daher wird hier auf die Auswertung der Serie verzichtet. Statt dessen werden nur die Werte der ersten und letzten Trainingssitzung über einen Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon miteinander verglichen. Ein nicht-parametrischer Test wurde gewählt, da keiner der vorgestellten Parameterverteilungen einer Normalverteilung folgt: Alle vorgestellten Parameter wurden mit einem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung getestet. Die Hypothese einer Normalverteilung kann in jedem Fall unter $\alpha < 0.001$ abgelehnt werden.

Für die Frage, welche Streckenabschnitte sich wann etablieren, konnte der L-Test dagegen verwendet werden, da es hier für alle Probanden gleich viele Datenpunkte gab.

¹⁶Zu den genannten Tests siehe auch Kapitel 2.5, Seite 17 f

3.3 Diskussion

In dem hier vorgestellten Experiment wurde das Routenlernen von Menschen in einer relativ großen virtuellen Umgebung mit unregelmäßig verteilten Hindernissen untersucht. Die Aufgabe bestand darin, zwischen zwei feststehenden Zielpunkten hin und her zu navigieren. Die Route wurde weder direkt vorgegeben noch durch zusätzliche Vorgaben, wie beispielsweise der, eine möglichst kurze Route zu finden, eingeschränkt. Betrachtet wurde die Entwicklung verschiedener Laufparameter wie Geschwindigkeit und Geradlinigkeit und insbesondere auch die Variabilität der letztlich etablierten Wege.

Laufparameter Nur sechs der elf Probanden schafften es innerhalb der 5 bis 9 Sitzungen, das gestellte Lernkriterium von zwei Pfaden pro Minute zu erfüllen, drei weiteren Probanden gelang dies in dem anschließend durchgeführten Versuch (vgl. Kapitel 8). Ein Proband musste nach der 6. Trainingssitzung aus Zeitgründen aufhören (EH23), einem weiteren Probanden (IW25) gelang es während des gesamten Experimentes nicht, die Aufgabe zu meistern. Demnach war die Aufgabe zwar deutlich schwerer als erwartet, aber erlernbar. So erhöhte sich im Verlauf des Experimentes die Anzahl der pro Minute zurückgelegten Pfade bei zehn der elf Probanden (Ausnahme IW25) sowohl auf dem Hinweg, als auch auf dem Rückweg. Diese Steigerung hatte drei Ursachen:

Erstens suchten die Probanden die Umgebung immer effektiver ab, indem sie ihre Suche auf die korrekten Bereiche zentrierten. Mit zunehmendem Training fanden sie immer kürzere, weniger kurvige Routen. Diese entsprachen nicht notwendigerweise der Idealstrecke und waren am Ende des Trainings ungefähr in der Hälfte der Fälle (bei fünf Probanden) für den Hin- und Rückweg unterschiedlich.

Zweitens liefen die Probanden im Mittel immer schneller.

Hierbei gab es eine interessante Ausnahme. IW25 lief zu Beginn recht zügig und wurde dann immer langsamer, möglicherweise war er durch den ausbleibenden Erfolg frustriert oder verunsichert. Insgesamt bestand jedoch keine Korrelation zwischen der Streckenlänge (als Maß der Routensicherheit) und der gewählten Laufgeschwindigkeit. Der Korrelationskoeffizient betrug bei Betrachtung der sitzungsweise gemittelten Daten -0.14 (vgl. Abbildung 17a, Seite 29) und -0.28 , wenn jeder Pfad für sich bewertet wurde. Es traf also nicht zu, dass die Probanden bei großer Routenunsicherheit generell langsamer liefen.

Drittens und letztens verbrachten die Probanden immer weniger Zeit im Stehen, allerdings war dieser Trend nicht signifikant. Die Anzahl der Pausen dagegen nahm signifikant ab, wobei die mittlere Pausendauer wiederum konstant blieb. Während bei den Pfaden zum Feeder die Pausenzahl pro Strecke abnahm, war die Abnahme der Pausenzahl pro Strecke auf den Wegen zum Nest nicht signifikant.

Dies könnte möglicherweise ein Hinweis darauf sein, dass die Wegen zum Feeder im Mittel besser beherrscht wurden als die Rückwege zum Nest. Generell scheinen bei größerer Routensicherheit weniger Orientierungsstopps eingelegt zu werden, ihre Dauer scheint im Mittel jedoch konstant zu bleiben. Dies bedeutet allerdings weder, dass alle Pausen gleich lang waren, noch, dass zwangsläufig jede Pause zur Orientierung genutzt wurde. So entsteht bei jeder Schubumkehr (Vorwärts-/ Rückwärtslaufen wechseln) und bei jedem versehentlichen Loslassen des Joypadhebels eine (kurze) Pause. In Pausen, die tatsächlich zur Orientierung genutzt wurden, sollte der Proband eine Rotation ausgeführt haben, sei es, um die eigene Position genauer einschätzen oder um sich die Umgebung besser einprägen zu können. Daher wäre eine Analyse nötig, welche nur die Länge der Pausen berücksichtigt, in denen der Proband eine Rotation ausführte. Allerdings ließe sich auch mit dieser Auswertung keine Aussage darüber treffen, wieviel Zeit ein Proband benötigt hat, um sich zu orientieren, da dies selbstverständlich auch im Laufen geschehen kann. Mit dem vorliegenden Versuchsaufbau läßt sich daher die Frage nach der Orientierungsdauer während des Lernvorganges nicht klären.

Es ist auffällig, dass die beiden Probanden, die besonders lang im Training waren (IW25 besonders bei den Rückwegen zum Nest, SM22 in beiden Richtungen), verglichen mit den anderen Probanden nur wenig Zeit mit Pausen verbracht haben. Es wäre denkbar, dass ein gewisser Pausenanteil notwendig ist, um eine ausreichende Orientierung zu ermöglichen. Allerdings bestand keine Korrelation zwischen dem Pausenanteil zu Beginn des Trainings und der Leistungssteigerung während des Trainings (Korrelationskoeffizient 0.23).

Vorausgehende Erfahrung Die Probanden unterschieden sich im Hinblick auf die Erfahrung, die sie vor dem Experiment bereits mit ähnlichen Umgebungen oder ähnlichen Eingabegeräten gemacht hatten. Hat die Erfahrung, die die Probanden im Vorfeld mit Computerspielen gemacht haben, ins-

besondere natürlich mit solchen Spielen, die es erfordern, durch unbekannte dreidimensionale Umgebungen zu navigieren, einen Einfluss auf das Verhalten im Experiment?

Es ließ sich kein linearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit, mit welcher der Proband sich zu Beginn des Trainings bewegte und der Spiele-Erfahrung ($KK=0.2$) oder der Erfahrung mit Joysticks ($KK=-0.27$) zeigen.

Einen kleinen Unterschied zwischen Viel-Spielern (Maximalwert 9 für die Computerspielerfahrung angegeben) und Wenig- (oder gar-nicht-) Spielern gab es noch bei der Benennung der Hindernisse. AN19 sprach von "Sälen" (die Hindernisse als Säulen), EH23 nannte ein großes Hindernis "Festung". Diese Kategorien tauchten nur hier auf, während die anderen Bezeichnungen sich durchaus bei verschiedenen Probanden wiederfanden. Konstellationen wurden beispielsweise als "Tunnel" oder "Platz" bezeichnet, einzelne Hindernisse generell als "Wand", "Säule" oder "Böpsel". Nie jedoch wurden individuelle Hindernisse benannt. Allerdings tauchten durchaus öfters Begriffe wie "meine Wand" auf, die einer festen Landmarke zugeordnet waren. Die Probanden prägten jedoch in keinem Fall Namen für einzelne Hindernisse. Gewiss sind die Assoziationen und die jeweils gewählten Namen abhängig von der Art bisheriger Erfahrungen, möglicherweise sind sie einfacher zu knüpfen, wenn man bereits über eine gewisse Erfahrung mit virtuellen Umgebungen verfügt. Es wäre interessant, ob derartige Benennungen das Erfassen einer neuen Umgebung beschleunigen oder verbessern, indem sie ein Wiedererkennen bestimmter Objekte oder Plätze erleichtern. Allerdings korrelierte weder die angegebene Rechner- ($KK=0.23$) noch die Joystickerfahrung ($KK=-0.01$) mit der Lerngeschwindigkeit (gemessen als Steigung der pro Minute "gelaufenen" Pfade zwischen erstem und letztem Training).

Die Lerngeschwindigkeit stand auch in keinem linearen Zusammenhang zu dem selbstgeschätzten Orientierungssinn ($KK=-0.37$). Dies mag allerdings mit der einfachen Erfassung dieses Navigationsvermögens zusammenhängen. Andere Arbeiten haben ergeben, dass die Selbsteinschätzung ein gutes Maß für verschiedene Teilaspekte der räumlichen Orientierung bietet. Beispielsweise haben Hegarty u. a. (2002) einen Fragekatalog vorgeschlagen (SBSOD, Santa Barbara Sense of Direction Scale, dort sind auch Beispiele für weitere Selbstbeurteilungsexperimente zu finden), dessen Ergebnisse mit der anderweitig bestimmten Fähigkeit, sich in einer Umgebung zu orientieren, übereinstimmte. Dagegen erlaubten sie kaum Rückschlüsse auf die Fähigkeit zum Abschätzen von Streckenlängen oder das Zeichnen von Karten. Andere Studien ergaben entweder ebenfalls eine Korrelation oder keinen erkennbaren Zusammenhang. Hegarty et al. führen derartige Unterschiede auf die Formulierung der jeweiligen Frage(n) zurück und schlagen deshalb eine Vereinheitlichung des Ermittlungsverfahrens vor, um studienübergreifende Vergleiche zu ermöglichen.

Entwicklung der Routen Die anfänglichen Suchmuster sind mit verschiedenen Suchstrategien aus dem Tierreich vergleichbar, bei welchen die Umgebung möglichst gründlich abgesucht werden soll. So lassen sich die "freien" Suchen (lange, annähernd parallel zueinander verlaufende, geradlinige Strecken ebenso wie das Umkreisen einzelner Hindernisse) beispielsweise mit den verschiedenen Fraßspuren Algen abweidender Schnecken vergleichen, während die sternförmig angelegten "Kleinexkursionen" von einem der Zielpunkte aus einem "Central-Place Foraging" ähneln. Hierbei wird zwischen den einzelnen Futtersuchen immer wieder ein zentraler Punkt aufgesucht. Hierbei kann es sich beispielsweise um ein Versteck (Bailey und Polis 1987) oder ein Nest mit Jungtieren, die versorgt werden müssen (Kacelnik 1984) handeln. Dem zentralen Punkt kommen in jedem Fall bestimmte Bedeutungen zu, ob er nun als Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen oder Fressfeinden dient oder einen Treffpunkt mit Artgenossen darstellt. In dem hier vorgestellten Versuch wurde durch den zentralen Platz sichergestellt, dass trotz der unbekanntenen Umgebung die eigene Position immer wieder (bei jeder Rückkehr zum Bezugspunkt) eindeutig bestimmt werden konnte. Die freie Suche ermöglichte dagegen vor allem ein gründliches und effektives Absuchen einer größeren Umgebung, wie es auch bei dem möglichst effektiven Abweiden eines Algenfleckens der Fall ist.

Mit zunehmendem Training konnten die Probanden ihre Suche immer besser auf das Umfeld der Zielpositionen begrenzen. Während zu Beginn des Trainings die Trajektorien noch über die gesamte zwischen den Hindernissen liegende Fläche verteilt waren, nahm diese Fläche während des Trainings stark ab. Bei der Betrachtung der abgesuchten Bereiche fiel auf, dass die Position des Nestes häufig¹⁷ falsch eingeschätzt wurde. Dies mag damit zusammenhängen, dass die Position des Feeders ungefähr gleichweit von den umgebenden Rändern entfernt war, während das Nest abseits eines derart zentralen Punktes lag. Die Trajektorien sprechen dafür, dass auch das Nest in einer entsprechenden Position vermutet wurde (vgl. nebenstehende Abbildung 29). Bereits das Blatt, welches den Probanden im Training zur Verfügung stand, enthielt die Information, dass das Ziel vom Feeder aus gesehen zwischen zwei bestimmten globalen Landmarken (blau und gelb) zu suchen sei, also näher an diesen Landmarken liegen würde als der Feeder. Durch den Startpunkt (dafür musste das Nest erhalten) erhielten die Probanden zusätzlich die Information, dass das Nest nicht direkt am Rand der Umgebung lag. Beide Informationen wurden mündlich von Probanden als Navigationshilfen genannt. Demnach mussten die Probanden sowohl vermeiden, zu nah an den Feeder zu kommen, als auch einen gewissen Mindestabstand zum Rand wahren. Die Distanz zum Feeder lässt sich grob über die Entfernung zu den globalen Landmarken (Abbildungsgröße der Landmarken und Winkel zwischen ihnen und dem eigenem virtuellen Standpunkt) abschätzen: Sind rot und grün deutlich näher als blau und gelb, befindet man sich zu nah am Feeder und muss die Richtung ändern. Kommt man dagegen zu nah an den Rand der Umgebung, muss man wiederum die Richtung ändern und sich wieder mehr auf das Zentrum der Umgebung zu bewegen. Durch ein solches Verhalten würde ein ähnlich "zentriertes" Suchmuster entstehen wie das beobachtete, ohne dass eine wirkliche Vorstellung von dem Umriss des mit Hindernissen besetzten Bereiches oder der genauen Lage des Nestes notwendig ist. Um die wahre Position des Nestes zu finden, ist diese Strategie allerdings ungeeignet. Der Schwerpunkt der Suche muss deutlich in Richtung auf die gelbe globale Landmarke und das große randständige Hindernis hin verlagert werden.

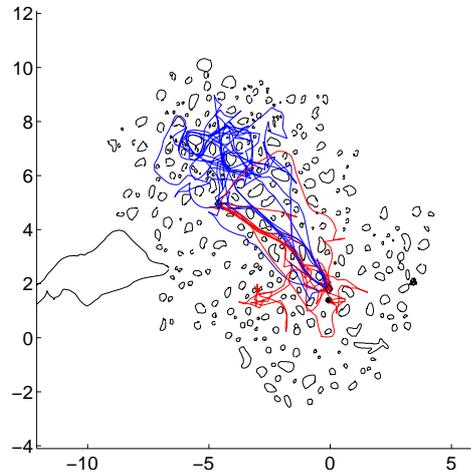


Abbildung 29: 4. Sitzung von AS25. Man beachte den verschobenen Suchschwerpunkt bei den Trajektorien zum Nest (blau)

Da zu Beginn die Positionen der Zielpunkte relativ zu den globalen Landmarken angegeben wurden, verwundert es nicht, dass die meisten Probanden sich zu Beginn eher an eben diesen globalen Landmarken orientierten. Allerdings haben auch AN19 und SN23 sich bereits zu Beginn an den globalen Landmarken orientiert, obwohl sie nach eigenen Angaben das Informationsblatt nicht gelesen hatten. Die beiden erarbeiteten sich die entsprechenden Informationen also durch Explorationsverhalten selbst. Später wurden lokale Landmarken (Hindernisse) für die Navigation immer wichtiger. Dieser Zeitversatz spricht dafür, dass erst Merkmale gefunden werden mußten, anhand derer sich die einzelnen Hindernisse und Konstellationen auseinanderhalten ließen. Genau bei dieser Wiedererkennung könnte eine Benennung individueller Hindernisse Hilfen bieten, da einmal gefundene Unterschiede im Namen festgehalten und möglicherweise besser im Gedächtnis gehalten werden könnten.

Nach Siegel und White (1975) werden kognitive Karten aufgrund von vernetzten vorher erlernten Routen aufgebaut. Die anfänglich (grobe) globale, später (feine) lokale Orientierung spricht jedoch dafür, dass zunächst ein grobes Übersichtswissen aufgebaut wurde, das später (wenigstens bei Konstruieren) immer mehr von Routenfolgen abgelöst wurde.

Werden Hin- und Rückweg gemeinsam gelernt? Hin- und Rückweg scheinen zunächst getrennt voneinander gelernt zu werden. 7 der 10 Probanden, welche die Aufgabe innerhalb der gegebenen Zeit meisterten, etablierten zunächst unterschiedliche Routen für die beiden Laufrichtungen. Im weiteren Verlauf des Trainings wurde in drei Fällen der eine Pfad dem Verlauf des anderen angepasst. Dabei waren jeweils mehrere Durchgänge nötig, bevor die Route in der anderen Richtung ebenfalls beherrscht wurde. In Abbildung 10 (Seite 24) ist abzulesen, dass die Ähnlichkeit der Hin- und Rückwege auch

¹⁷ von sieben der elf Probanden

während des letzten Trainings dennoch im Regelfall deutlich unter der Ähnlichkeit innerhalb einer Richtung lag. In diesen Fällen unterscheiden sich die Hinwege also von den Rückwegen und wurden getrennt voneinander gelernt.

Bei drei Probanden entwickelten sich dagegen in beiden Richtungen zur gleichen Zeit sehr ähnliche Routen. Diese Ähnlichkeit allein besagt noch nicht zwingend, dass die Wege tatsächlich gemeinsam erlernt wurden. So verliefen die Trajektorien in zwei dieser Fälle (SM22, TS21) zwar durch dasselbe Gebiet, wurden jedoch ständig leicht variiert. Zudem existierte bei TS21 bereits eine konstante Route für den Hinweg, bevor der Rückweg beherrscht wurde (vgl. Abbildung 24, Seite 36). Diese wurde im weiteren Verlauf des Trainings deutlich variabler und nutzte schließlich dieselben Bereiche wie der ebenfalls um diese Zeit etablierte Rückweg. Im dritten Fall (SP20; vgl. Abbildung 25, Seite 37) spricht die Auswertung der Angaben, die der betroffene Proband während des Trainings machte, dagegen, dass hier bewußt ein und dieselbe Route in beiden Richtungen verwendet wurde. Der Proband zählte auf, an was er sich orientierte. Dabei wurde deutlich, dass er nicht auf beiden Wegen dieselben Landmarken oder Orientierungshilfen nutzte. So tauchte auf dem Hinweg ein Tunnel¹⁸ auf, der auf dem Rückweg nicht erwähnt wurde. Der Proband nannte auf beiden Strecken bestimmte lokale Landmarken, auf die er zu lief oder an welchen er die Richtung zu ändern hatte, und auch diese Landmarken stimmten hin und zurück nicht überein. Die Strecke wurde anscheinend aus der jeweils anderen Richtung, also aus einer anderen Blickrichtung, nicht wiedererkannt. Diese Ergebnisse lassen sich so interpretieren, dass sich das Wissen, das man in der einen Richtung über einen Abschnitt der Umgebung erworben hat, nicht direkt in der anderen Laufrichtung anwenden läßt.

Dafür spricht auch, dass die Effizienz sich nicht in der Nähe eines bestimmten Punktes (beispielsweise des Nestes) in beiden Richtungen gleich verhält, gleichgültig, ob dieser gerade als Start oder Ziel dient. Dies wäre bei einem richtungsinvariantem Lernen zu erwarten, da dann die Gegend, nicht die Richtung, erlernt werden sollte. Statt dessen entwickelte sich die Effizienz jeweils vom Startpunkt zum Ziel. Dies war auch bei den drei Probanden der Fall, bei welchen sich Hin- und Rückweg stark ähnelten.

Cornell u. a. (1996) dagegen fanden, dass sowohl Anfang als auch Ende einer Route gut im Gedächtnis blieben. Sie führten Kinder (12 Jahre alt) einen Rundweg über einen, den Kindern unbekanntem, Campus. Am Zielpunkt angekommen, sollten die Kinder denselben Weg wieder zurück laufen. Der Versuch wurde mit zwei Gruppen durchgeführt. Die Probanden der ersten Gruppe wurden kurz vor jedem Entscheidungspunkt gefragt, welche Richtung der zuvor geführten Route entsprach. Entschieden sie sich falsch, wurde ihnen dies sofort mitgeteilt und die Route wurde korrekt fortgeführt. Die zweite Gruppe erhielt keine derartigen Korrekturen. Das Ergebnis war jedoch das selbe. Demnach läßt sich der Unterschied zu der vorliegenden Studie nicht dadurch erklären, dass hier jeder Fehler zum Verlassen der Strecke führte, so dass die folgenden Bereiche zwangsweise anders ausfielen als zuvor.

Cornell et al. beschreiben in einer früheren Arbeit ein Modell, das allein über die Bekanntheit von Ansichten auf einer Route deren Vervollständigung ermöglicht (Cornell u. a. 1994). Zur Reproduktion eines bereits abgelaufenen Weges folgt man nach diesem Modell der Bekanntheit der jeweiligen Ansichten. An jedem Punkt der Route bewegt man sich in die Richtung, deren Bekanntheit am größten ist. An einer Kreuzung, an welcher keine Richtungsänderung erfolgen muss, sind die Landmarken, die geradeaus zu erkennen sind, die bekanntesten. Die Ausrichtung entspricht der bekannten und man hatte bereits Gelegenheit, die Landmarken aus der Nähe zu betrachten, da dieser Weg bereits besritten wurde. Die seitlichen Ansichten sind dagegen deutlich weniger bekannt. Die Ansicht in der Richtung, aus der man kommt, sollte von mittlerer Bekanntheit sein, da die Landmarken zwar bereits passiert wurden, jedoch bisher nur aus anderen Ansichten betrachtet werden konnten. Der Rückweg ließe sich diesem Modell zufolge auf dieselbe Weise bewältigen, allerdings muss nun jeweils die Richtung mittlerer Bekanntheit gewählt werden. Die Konfiguration der Landmarken ist freilich eine neue, die Abfolge ist umgekehrt und gespiegelt. Für diese Art der Navigation wird weder sequenzielles Wissen (von der Art "rotes Haus, dann große Eiche, dann Brücke") noch eine Karte vorausgesetzt. Die einzelnen Landmarken müssen jedoch aus verschiedenen Ansichten soweit erkannt werden, dass eine Einordnung in "bekannt" oder "unbekannt" möglich wird (ein individuelles Erkennen oder gar Assoziation von Landmarke und folgender Richtung ist dagegen nicht notwendig).

Eine Schwierigkeit bei der Umkehr einer Route besteht daher auch in diesem Modell sicherlich darin, dass Hindernisse oder Ansichten aus der jeweils umgekehrten Perspektive nicht als "bekannt" erkannt

¹⁸"Tunnel" beschreibt hier eine Anordnung von Hindernissen, die auch mit einer unregelmäßigen Allee oder einer wenig umbauten Straße verglichen werden könnte. Auf beiden Seiten einer freien, geraden Strecke liegen mehrere Hindernisse annähernd hintereinander.

werden. Die große Ähnlichkeit der in dieser Umgebung verwendeten Hindernisse hat dieses Problem gewiss verstärkt.

Dennoch gab es einzelne Hindernisse, die aus jeder Blickrichtung wiedererkannt wurden. Das wohl eindeutigste solche Hindernis war das große randständige, welches von ausnahmslos allen Probanden wiedererkannt wurde. Dennoch wurde es nicht von allen zur Orientierung genutzt (TK23 etwa gab an, die Wand brächte ihm "Unglück" und verließ das Gebiet wahllos in irgendeiner Richtung). Andere Hindernisse prägten sich nur einzelnen Probanden aus verschiedenen Perspektiven ein (FW23 und TS21 beispielsweise orientierten sich an einzelnen Hindernissen, die sie auch aus verschiedenen Richtungen wiedererkannten: "Da ist meine Wand!"). Dazu kommt, dass das Wissen über die betrachtete Landmarke und ihre Umgebung zu einem Zeitpunkt, zu dem die Landmarke in der einen Richtung bereits sicher als Orientierungshilfe genutzt werden kann, zu unvollständig sein kann, um eine Navigation in beiden Richtungen zu erlauben. Ein Ausschnitt meiner eigenen Navigationsversuche durch die verwendete Umgebung soll hier als Veranschaulichung dienen: In der einen Richtung folge ich einem Tunnel bis zu dem Hindernis, das dessen "Abschluss" zu bilden scheint. Dort biege ich entlang dieses Hindernisses nach links ab. Selbst wenn ich diese Landmarke aus der anderen Richtung wiedererkenne, fällt es schwer, den genauen Punkt, an dem man auf dem Hinweg auf das Hindernis gestoßen ist, zu bestimmen. Auch die genaue Richtung, in die abgebogen werden muss, ist schwer zu finden. Dazu müßte man den Tunnel, dem man auf dem Hinweg gefolgt ist, wiedererkennen. Er ist jedoch aus dieser Richtung schwerer zu identifizieren, da sich von diesem Standpunkt aus betrachtet noch andere, ähnliche Konstellationen anbieten. Die Bekanntheit verschiedener Ansichten ist also nicht unterschiedlich genug, um eine sichere Navigation wie in dem von Cornell u. a. (1994) beschriebenen Modell zu erlauben.

Ähnlichkeit der letzten Trajektorien Ein Ähnlichkeitswert nahe 1 bedeutet, dass der Proband bei jedem Durchgang nahezu identischen Pfade folgt (ein Extrembeispiel bietet FW23). Demensprechend bedeuten niedrige Werte eine hohe Variabilität. Diese kann entweder durch Unwissenheit und Navigationsfehler bedingt sein (IW25), oder der Proband variiert die gewählten Pfade bei jedem Durchgang leicht, etwa indem er an verschiedenen Seiten eines Hindernisses vorbei navigiert (AS25, TS21). Der Ähnlichkeitswert sollte allerdings nicht dazu herangezogen werden, gleichzeitig Lernzustand des Probanden und Ähnlichkeit der tatsächlich etablierten Routen zu beurteilen. AS25 beispielsweise zeigte einen relativ niedrigen Ähnlichkeitswert (Ähnlichkeit hin und zurück jeweils 0.55, im Vergleich von Hin- und Rückweg 0.53). Dies war jedoch nicht durch Unkenntnis zu erklären: Er verlief sich in beiden Richtungen während des letzten Trainings nur ein einziges Mal und wußte ansonsten sehr genau, wohin er lief. AN19 dagegen zeigte auf dem Rückweg eine wohletablierte und sehr konstante Route (Ähnlichkeit 0.98), auf dem Weg zu Feeder erreichte er noch eine Ähnlichkeit von 0.74 (beides im Vergleich 0.73) und damit einen deutlich höheren Wert als AS25. Betrachtet man aber seine Trajektorien, wird deutlich, dass er sich auf dem Hinweg mehrmals verlaufen hat, die im Vergleich zum Rückweg niedrigere Ähnlichkeit also nicht daran lag, dass er auf dem Hinweg eine konstante Route etablierte, während der Rückweg variabel blieb. In diesem Fall wäre ein weiteres Training nötig gewesen, um herauszufinden, ob der Proband auch auf dem Hinweg eine konstante Route ausbilden würde.¹⁹ Um allein aufgrund der Ähnlichkeit unterscheiden zu können, ob ein Proband einer variablen Route folgte oder sich häufig verlief, müßte die Ähnlichkeit der Routen über die Zeit dargestellt werden. Folgt der Proband variablen Routen, sollte die Ähnlichkeit über die Zeit einigermaßen konstant bleiben. Findet der Proband sich dagegen in der Umgebung noch nicht zurecht, sollte die Ähnlichkeit starken Schwankungen unterliegen. Desweiteren ließe sich mit einem solchen Maß überprüfen, ob Probanden, die zum Ende des Trainings variable Routen etabliert haben, zu einem früheren Zeitpunkt festen Routen gefolgt sind, die Ähnlichkeit also eine gewisse Zeit über sehr hoch war, um dann wieder abzusinken. So folgte beispielsweise TS21 bei den Strecken zum Feeder bereits in der 3. Traininssitzung einer festen Route, die aber später immer variabler wurde. Eine derartige, langsame Erweiterung des regelmäßig besuchten Gebietes ermöglicht es, die Kenntnis über die nähere Umgebung auszudehnen, ohne ein Verirren zu riskieren. Auch der umgekehrte Fall (von variablen Strecken auf konstante) ist denkbar, wurde jedoch in den vorliegenden Daten nicht gefunden. Eine solche Strategie kann beispielsweise darauf zielen, die gestellte Aufgabe in immer kürzerer Zeit zu bewältigen, etwa indem die Route immer weiter optimiert wird. Auch ist es so möglich, den Einsatz des Joypads durch andauerndes Training ein

¹⁹Ein weiteres "Kurz-Training" fand während der Suche (vgl. Kapitel 8) statt. Hier war auch der Hinweg von AN19 sehr konstant. Im Training war diese Konstanz wegen der häufigen Umwege nur schwer zu erkennen gewesen.

und derselben Route zu perfektionieren, so dass trotz hoher Laufgeschwindigkeit und möglichst kleiner Ausweichbewegungen um Hindernisse Zeit kostende Kollisionen vermieden werden können. FW23 etwa folgte sehr häufig der selben Route, ohne sie zu optimieren. Seine Laufgeschwindigkeit nahm kontinuierlich zu und näherte sich gegen Ende des Trainings der maximal möglichen. Allerdings zeigten auch Probanden mit variablen Wegen hohe Laufgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 16, Seite 29). Für eine solche Auswertung sollte das Training freilich nicht bereits abgebrochen werden, sobald die Probanden in der Lage sind, zwischen den beiden Zielpunkten zuverlässig hin und her zu navigieren.

Viele Arbeiten zeigen, dass häufig mehrere Systeme parallel zur Verfügung stehen, um eine Navigationsaufgabe zu lösen (beispielsweise Aginsky u. a. 1997, Poldrack u. a. 2001, Hartley u. a. 2003). Ein anschauliches Beispiel dafür, das ein und dasselbe Problem auf verschiedene Weise angegangen werden kann, bilden schon die hier beobachteten variablen Muster, mit denen die Probanden die Umgebung während des Trainings absuchten. Hierbei konnte entweder der Bezug zu einem Startpunkt im Vordergrund stehen (wie das etwa bei speichenartig angeordneten geraden Strecken der Fall war, die immer wieder rückwärts zum Anfang zurückverfolgt wurden) oder das gründliche Absuchen großflächiger Gebiete (parallel zueinander ausgerichtete geradlinige Spuren, "Rüschen", "Sternchen" etc.). Dabei kam es vor, dass ein Proband zu verschiedenen Zeiten auf unterschiedliche Strategien zurückgriff oder mehrere Strategien kombinierte.

Auch die Unterschiede in der Ähnlichkeit der Schlussrouten²⁰ legen den Schluss nahe, dass unterschiedliche Strategien angewandt wurden, um die gestellte Aufgabe zu lösen. Hier stellt sich die Frage, ob den unterschiedlichen Ähnlichkeiten unterschiedliche Repräsentationen der Umgebung zugrunde lagen.

So kann beispielsweise wiederholtes Verfolgen von unveränderlichen Routen zur Ausbildung eines Motorprogrammes²¹ genutzt werden, welches es ermöglicht, die kognitive Last, die für der Navigation notwendig ist, zu minimieren (Iaria u. a. 2003). Die Ausbildung eines solchen ist bei ständig variierten Strecken dagegen kaum zu erwarten.

Einer konstanten Route könnte prinzipiell eine Navigationsstrategie zugrunde liegen, die der von Etchamendy et al. (Etchamendy und Bohbot 2007) als "response-learning" oder "route-learning" bezeichneten Strategie entspricht. Laut dieser Studie folgten "response learner" einer Route, indem sie eine Sequenz aus egozentrischen Richtungsangaben (rechts-links) abliefen. Diese Sequenz konnte entweder allein auf die jeweilige Startposition, oder eine zusätzliche externe Landmarke bezogen sein. Allerdings ist damit nicht gesagt, anhand welcher Reize entschieden wird, an welchen Stellen der nächste Sequenzschritt abgerufen werden muss. Im Falle des Etchamendy-Experimentes waren diese Punkte durch die Abzweigungen innerhalb eines Labyrinthes gegeben. Ebenso war die Auswahl möglicher Wegrichtungen durch das Labyrinth vorgegeben. Zwischen einzeln stehenden Hindernissen dagegen ist eine Unterteilung der Entscheidungen in rechts und links nicht ausreichend, um den folgenden Kurs festzulegen. Um in einer Umgebung wie der vorliegenden erfolgreich zu sein, müsste diese Strategie demnach um zwei Aspekte erweitert werden. Zum einen müssen, analog zu den Kreuzungen im Labyrinth, Schlüsselorte gespeichert werden, an welchen jeweils eine Richtungsänderung erfolgt (Stimulus-Response, S-R). Zum zweiten muss nicht die Drehrichtung, sondern das Ausmaß der Drehung gespeichert werden. Die folgende Laufrichtung ließe sich entweder direkt über die Drehung ("um 90° nach rechts") beispielsweise mithilfe der jeweils folgenden "Schlüssellandmarke" bestimmen. Dies setzt nicht zwangsläufig voraus, dass bereits im Vorfeld eine Erwartung über die folgende Landmarke (S') besteht (S-R-S'), sie kann auch erst an dem jeweils vorausgehenden Entscheidungspunkt erkannt werden.

Im folgenden Teilversuch wurde die Sichttiefe durch Nebel begrenzt. Um unter diesen Bedingungen verwendbar zu bleiben, darf die folgende Landmarke (falls eine solche zur Richtungsfindung notwendig ist) nicht zu weit von dem jeweils vorangehenden Entscheidungspunkt entfernt liegen. Variable Routen würden bei einer solchen Strategie eine Vielzahl von gespeicherten Entscheidungspunkten voraussetzen, was eine solche Strategie sehr aufwendig und daher unwahrscheinlich macht.

²⁰ Gut die Hälfte der Probanden folgte tendenziell eher konstanten Routen, die andere Hälfte variierte.

²¹ Motorprogramm beschreibt hier eine Abfolge von Motorkommandos (hier die Bedienung des Joypads während der Navigation), deren Abfolge nicht mehr bewußt gesteuert werden muss.

Variable Routen dagegen entstehen bereits dadurch, dass ein Proband bewußt (AS25 und TS21 gaben an, absichtlich ihre Routen zu variieren) oder unbewußt auf verschiedenen Seiten an den Hindernissen oder Gruppen von Hindernissen vorbeigeht. Der Unterschied zur festen Route scheint also sehr gering. Um jedoch erfolgreich navigieren zu können, ist hier zumindest ein grobes Richtungswissen notwendig, welches es ermöglicht, nach dem das Hindernis auf neue Art umlaufen wurde, die ursprüngliche Laufrichtung wieder aufzunehmen. Eine derartige Korrekturrichtung ist für das unflexible Routenfolgen nicht notwendig.

Für ein solches Richtungswissen muss die Änderung der eigenen Laufrichtung relativ zur bisherigen Ausrichtung bestimmt und auf das jeweilige Ziel ausgerichtet werden können. Es muss also auch von neuen Positionen aus, die in der Nähe von bekannten Positionen liegen, abschätzbar sein, in welcher Richtung das Ziel (oder der nächste Hilfspunkt auf der Strecke) liegt. Eine Variante, dieses Problem zu lösen, besteht in zuverlässiger Wegintegration, wie sie beispielsweise bei Ameisen der Gattung *Cataglyphis* beobachtet wurde (vgl. Abbildung 30, aus Wehner 2003). In diesem Fall bildet der Zielpunkt den Ursprung des gebildeten "Heimvektors".

Eine andere Möglichkeit, die Zielrichtung auch von wenig bekannten Positionen abzuschätzen, bieten kognitive Karten.

Mit Hilfe einer solchen mentalen Repräsentation, in welcher die grobe Umgebung mit den Positionen der Ziele sowie die korrekte Ausrichtung der Karte (beispielsweise anhand der vier farbigen Säulen) repräsentiert werden, sollte es dem Probanden möglich sein, sich den Zielpositionen von überall her zu nähern, vorausgesetzt, er ist in der Lage, die eigene Position auf dieser Karte zu bestimmen. Eine auffällig Strategie zur Selbstlokalisierung stellen die "Orientierungsblicke" dar, die AN19 mit dem Verlassen der Umgebung zeigte. Er orientierte sich dabei nach eigenen Angaben an der Position der globalen Landmarken relativ zur Umgebung (vgl. Zitat Seite 39). Mit dieser Methode war er in der Regel in der Lage, das Nest recht direkt anzulaufen. Allerdings gelang diese Technik nicht jedes Mal²² und wurde auch nicht bei jedem Verlaufen angewendet (vgl. Abbildung 7, Seite 23). Demnach verfügte der Proband noch über andere Möglichkeiten, seine Position zu bestimmen.

Folgender Versuch Wie sicher die Lokalisation der eigenen Position relativ zu den Zielpositionen funktionierte, wird in den Kapiteln 6 und 7 untersucht. Im nächsten Kapitel soll zunächst überprüft werden, ob am Ende des Trainings bei der Orientierung anhand von Landmarken vorwiegend Landmarken genutzt wurden, die nah der jeweiligen virtuellen Position der Probanden lagen, oder auch globale Landmarken und andere, weiter entfernte Orientierungspunkte eine Rolle spielten.

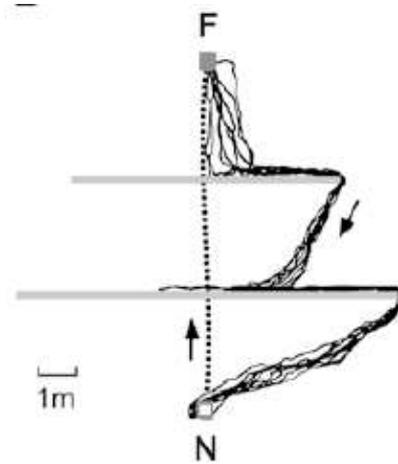


Abbildung 30: Rückwege einer Ameise (*Cataglyphis fortis*) um Hindernisse. Die Aluminiumsperrbalken (graue Balken) konnten auf dem Hinweg zum Feeder (F, gepunktete Linie) passiert werden, auf dem Rückweg zum Nest (N, durchgezogene Linie) mussten sie umlaufen werden. Die Ameise läuft von jedem Hindernis aus direkt auf die Nestposition zu, ist also in der Lage, ihre Position relativ zum Nest abzuschätzen. Abbildung aus Wehner 2003.

²²Die Auswertung der mündlichen Kommentare (vgl. Zitat Seite 39, in Kapitel 3.2.10) zeigte, dass die Annahmen, die AN19 sich zur Position des Nestes relativ zu den globalen Landmarken gemacht hatte, nicht ganz korrekt waren, weshalb die Strategie nicht in jedem Fall funktionierte.

4 Nebel

4.1 Fragestellung und Durchführung

Im Training standen den Probanden unterschiedliche Orientierungshilfen zur Verfügung. Außer den Hindernisse ("lokale Landmarken") und deren geometrische Anordnung zueinander waren das die weit entfernten globalen Landmarken in Form von den vier farbigen Säulen, dem Waldhintergrund und der Verteilung der Wolken am Himmel. Um untersuchen zu können, welche dieser Orientierungspunkte tatsächlich für ein erfolgreiche Navigation nötig waren, wurde die Sicht in der ansonsten unveränderten Umgebung²³ durch Nebel auf die nächstgelegenen Hindernisse beschränkt. Dadurch wurden nicht nur die globalen Landmarken, sondern auch größere Konstellationen lokaler Landmarken wie längerer Fluchten und ähnlichem unbrauchbar. Abbildung 31 soll eine Vorstellung von der Wirkung dieses Nebels vermitteln. Die Aufgabe der Probanden bestand, wie bereits im Training, darin, zwischen den beiden Zielen hin und her zu steuern. Auch die Dauer der Sitzung (20 Minuten) glich den Trainingsbedingungen.

Der Nebel wurde in C++ realisiert, begann 1 EE von der virtuellen Kameraposition entfernt und war leicht hellblau. Ab einer Entfernung von 2 EE war die Umgebung einheitlich hellblau. Programmbedingt wurde leider auch der Untergrund "vernebelt" dargestellt. Vermutlich lag dies daran, dass die Bodentextureinheiten so groß waren, dass sie immer Punkte umfassten, die bereits im Nebelbereich lagen.

Da eine Flächeneinheit überall gleich behandelt wurde, wurde die ganze Fläche vernebelt dargestellt. Allerdings flackerte die eigentliche Bodentextur zwischendurch immer wieder kurz auf. Obwohl alle Probanden die am Ende des Versuches gestellte Frage, ob der fehlende Boden oder das Aufflackern sie störten, verneinten, ist nicht auszuschließen, dass die Navigationsleistung dennoch unbewusst beeinträchtigt wurde.

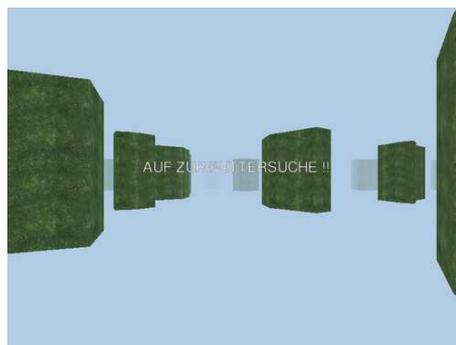


Abbildung 31: Beispiel für die Ansicht mit Nebel.

Da eine Flächeneinheit überall gleich behandelt wurde, wurde die ganze Fläche vernebelt dargestellt. Allerdings flackerte die eigentliche Bodentextur zwischendurch immer wieder kurz auf. Obwohl alle Probanden die am Ende des Versuches gestellte Frage, ob der fehlende Boden oder das Aufflackern sie störten, verneinten, ist nicht auszuschließen, dass die Navigationsleistung dennoch unbewusst beeinträchtigt wurde.

4.2 Ergebnisse

Reaktionen der Probanden Die meisten Probanden (sieben der elf) äußerten sich verwirrt zu der veränderten Umgebung (häufigster spontaner Kommentar²⁴ war "Ich hab keine Ahnung, wo ich bin."). Dennoch erkannten die meisten Probanden bestimmte Hindernisse wieder. Acht der Probanden machten konkrete Angaben zu wiedererkannten Landmarken. Teilweise waren diese Landmarken mit Richtungsinformationen verbunden. So nannte SN23 am Feeder die Blickrichtung, wenn man vom Nest ankommt, "eindeutig"; aus dieser Ausrichtung galt es zu rotieren, bis ein bestimmter "kleiner Böpsel" (Zitat) ins Blickfeld rückte, dann war die Initialrichtung zum Nest korrekt. Mehrmals reagierten Probanden mit deutlicher Erleichterung auf das Wiedererkennen einzelner Hindernisse. "Ich hab wieder ne Richtung! Danke, oh du große Mauer!" war beispielsweise ein Kommentar von AN19. Manche Landmarken wurden erkannt, aber nicht zur Orientierung genutzt. TK23 fand das große randständige Hindernis wie bereits im Training einfach nur "böse", ohne eine Richtung damit zu verbinden, Zitat: "Hhh! Da is die böse Mauer! Schnell weg!". BG27 dagegen nutzte dasselbe Hindernis im Training lange Zeit zur Navigation (vgl. Abbildung 27, Seite 38). Teilweise bemerkten die Probanden es auch, wenn die Umgebung ungewohnt wurde. TK23 beispielsweise bemerkte eine Abweichung von seinem normalen Pfad relativ bald und versuchte dann, den Kurs durch kurzzeitiges Rückwärtsnavigieren zu korrigieren. EH23 erkannte an einem Hindernis, dass er auf dem falschen Platz nach dem Ziel suchte: "Auf meinen Platz gehört keine Säule. Zumindest nicht so mittig." Zwei der drei Probanden mit falsch platziertem Feeder (AS25, FW23) bemerkten schnell, dass die Umgebung nicht vollkommen mit dem

²³Leider war die Position des Feeders wie in Abbildung 61 (Seite 98) dargestellt, bei drei Probanden falsch eingestellt, so dass bei ihnen (wenn überhaupt!) nur die Starttrajektorie bis zum ersten Erreichen der ursprünglichen Zielposition in der Auswertung verwendet werden kann. Im Folgenden werden sie gesondert behandelt und in Abbildungen wo möglich durch einen Rahmen markiert.

²⁴Sämtliche Zitate sind spontane Aussagen der Probanden. Es wurde keine Befragung durchgeführt, weshalb nicht alle Probanden die selben Themengebiete abdeckten.

Training übereinstimmte. Sie waren allerdings nicht in der Lage, den eigentlichen Unterschied, also die Verschiebung des Feeders auf den benachbarten Platz, zu erkennen. Statt dessen bezogen sich beide auf konkrete Landmarken, die scheinbar fehlten (AS25: "Nach DER LM am Nest geht's nicht richtig weiter". FW23: "Hier fehlen die ganzen großen Wände, die ich sonst immer hatte"). Auch AN19 zweifelte anfangs an der Umgebung, obwohl bei ihm keine Veränderungen vorlagen. Er benannte allerdings keine konkreten Unterschiede.

Nicht alle Probanden wurden durch den Nebel in ihrer Orientierung irritiert. Zwei Probanden gaben an, der Nebel störe überhaupt nicht (SN23, BG27). SN23 erklärte dazu, dass er sich an "nahen Dingen" orientiere. "Wenn man hier ankommt" (vom Nest kommend am Feeder) "ist die Richtung eindeutig. Dann muss man sich drehen, bis man DIESEN Böpsel sieht und los." Zwar ist zu erwarten, dass auch diese beiden Probanden für eine Navigation abseits der gewohnten Route die globalen Landmarken nutzten. Auf ihrer bekannten Route aber benötigten sie keinerlei Informationen von weiter entfernt liegenden Hindernissen oder globalen Landmarken. Nur BG27 geriet während des Nebelversuches abseits dieser bekannten Bahn. Er verlor den Hinweg ein Mal, fand ihn aber rasch wieder, fädelt auf seiner gewohnten Rückroute ein, lief zurück zum Nest und von dort nochmals (diesmal fehlerlos) zum Feeder (vgl. Abbildung 32). SN23 verlief sich überhaupt nicht.

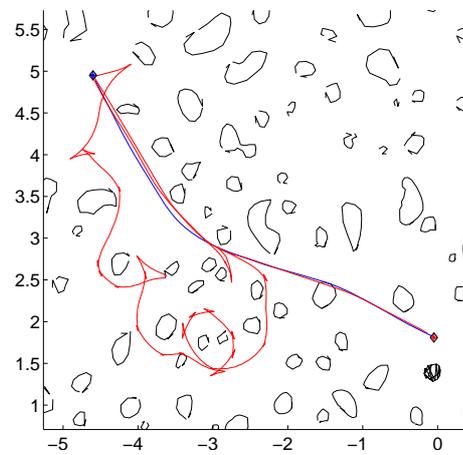


Abbildung 32: einziger Durchgang, bei dem BG27 im Nebel von der gewohnten Route abwich. Man beachte den Umweg über das Nest. Hinwege zum Feeder in rot, Rückweg zum Nest in blau eingezeichnet.

Tabelle 3: Beispielkommentare der Probanden Bei den farbig unterlegten Probanden unterschied sich die Position des Feeders von der im Training.

Verwirrung	AN19	"Ich bin verloren."
	AS25	"Kein Plan, wo ich bin."
	EH23	"Ich weiß, wo ich bin, aber ich weiß nicht, welche Richtung"
	FW23	"hab mich immer am Gesamtkunstwerk orientiert und jetzt klaut man mir alles."
Unbehagen	EH23	"Ungemütlich"
	TK23	"Unheimlich"
Landmarken	AN19	"Ich hab wieder ne Richtung! Danke, oh du große Mauer!"
	EH23	"Auf meinen Platz gehört keine Säule. Zumindest nicht so mittig."
	EH23	"Aber wenn das die Wand ist, mit der ich meine immer verwechsel, dann müßte ich eigentlich nur HIER lang..."
	FW23	"Hier fehlen die ganzen großen Wände, die ich sonst immer hatte."
	IW25	"Der Witz besteht natürlich darin, dass man hier keine Balken mehr sieht. Toll."
	SP20	"Wenn ich jetzt wüßte, welches meine Säule ist... Ich glaub, die da."
Kein Problem	BG27	"Nö, der Nebel stört nicht."

Geschwindigkeit Die Schrittlänge und damit die Laufgeschwindigkeit der Probanden blieb im Mittel auch in der veränderten Umgebung auf Trainingsniveau (vgl. Abbildung 33a, Seite 49). Auch die Anzahl der pro Strecke eingelegten Pausen sowie deren Dauer veränderte sich nicht (Wilcoxonstest in allen drei Fällen für p_{Hin} und $p_{Rück} > 0.05$, vgl. Abbildung 33b und 33c, Seite 49).

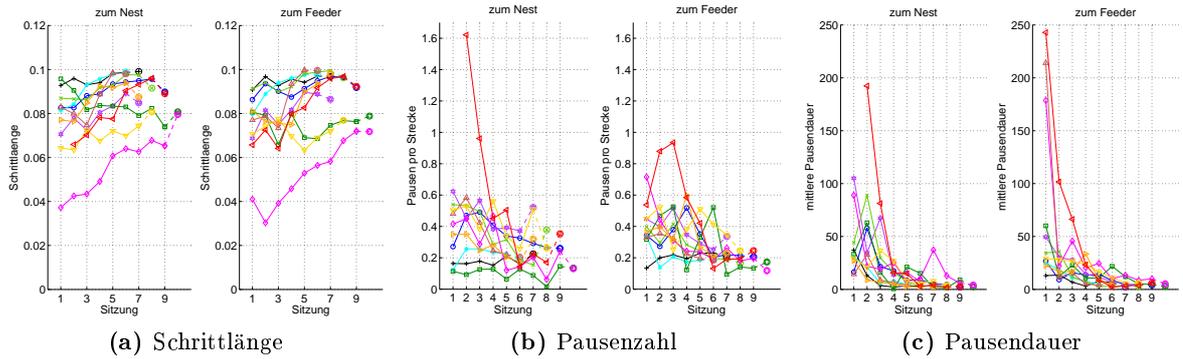


Abbildung 33: Vergleich von Training und Nebel. In **a** ist die mittlere Schrittlänge der einzelnen Probanden während der Trainingssitzungen und im Nebel dargestellt, in **b** die Anzahl der pro Strecke eingelegten Pausen und in **c** die mittlere Dauer dieser Pausen. Als Pause wird jeder Stopp mit einer Dauer von mindestens 5 Messwerten gewertet.

Die Trainingsdaten sind jeweils in der Probandencodierung dargestellt, die Nebelwerte sind mit ihnen durch eine gestrichelte Linie verbunden und haben einen zusätzlichen Kreis in der dem Probanden zugeordneten Farbe.

Abschätzung der Probleme Um auszuwerten, wie groß die Probleme der einzelnen Probanden mit der reduzierten Sichttiefe tatsächlich waren, wurden die resultierenden Trajektorien²⁵ den Kategorien "direkt", "kleiner Umweg" und "verlaufen" zugeordnet. Die Kategorien werden in Abbildung 34 (Seite 49) jeweils anhand einer Beispieltrajektorie vom Nest (links oben) zum Feeder (rechts unten) vorgestellt. In Tabelle 4 (Seite 50) ist aufgelistet, wieviel Prozent der Pfade eines Probanden in die jeweils betrachtete Kategorien fallen.

$$\text{Anteil von Kategorie } x = 100 \frac{\text{wie oft wurde Kategorie } x \text{ beobachtet}}{\text{wieviele Pfade insgesamt gelaufen}} \quad (8)$$

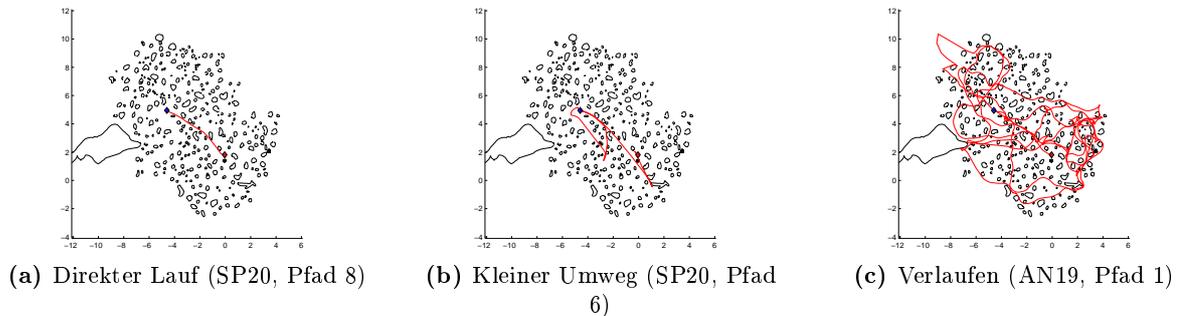


Abbildung 34: Kategorien der Nebeltrajektorien. Alle drei Beispieltrajektorien verlaufen vom Nest (links oben) zum Feeder (rechts unten).

Obwohl sich weder die Laufgeschwindigkeit der Probanden noch die Pausen im Nebel von den im Training gemessenen Werten unterschieden, nahm die Anzahl der pro Minute gelaufenen Pfade ("Leistung") im Nebel bei manchen Probanden deutlich ab (vgl. Abbildung 36, Seite 51), da die gelaufene Strecke sich signifikant änderte (Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon, p_{Hin} und $p_{\text{Rück}} < 0.05$). Das Ausmaß dieser Leistungsänderung wurde als Quotient zwischen Nebelleistung und letzter Trainingsleistung bestimmt:

$$\text{Leistungsänderung} = \frac{\text{Pfadanzahl pro Minute im Nebel}}{\text{Pfadanzahl pro Minute im Training}} \quad (9)$$

²⁵ Alle Trajektorien sind in Anhang D.2.2 dargestellt.

Tabelle 4: Prozent der Nebelpfade eines Probanden in den Kategorien "direkt", "kleiner Umweg" und "verlaufen". Der erste Wert bezieht sich auf die Pfade zum Nest, der zweite auf die Pfade zum Feeder. Bei den farbig unterlegten Probanden unterschied sich die Position des Feeders von der im Training.

Proband	direkt		kleiner Umweg		verlaufen		Pfadanzahl
	zum Nest	zum Feeder	zum Nest	zum Feeder	zum Nest	zum Feeder	
AN19	91	73	9	9	0	18	11
AS25	0	0	0	0	100	100	4
BG27	100	96	0	0	0	4	26
EH23	0	0	67	0	33	100	3
FW23	0	0	0	0	100	100	1
IW25	0	0	0	0	100	100	2
SM22	0	0	0	0	100	100	1
SN23	100	100	0	0	0	0	27
SP20	92	85	8	8	0	8	13
TK23	50	100	0	0	50	0	10
TS21	57	57	29	29	14	14	7

und ist in Abbildung 36b (Seite 51) dargestellt. Besonders große Veränderungen zum Training zeigten die drei Probanden, bei welchen die Position des Feeders unplanmäßig verschoben wurde (roter Rahmen in Abbildung 36b). Sie haben sich, trotz der eigentlich geringfügigen Zielverschiebung (vgl. Abbildung 61, Seite 98) jedes Mal verlaufen. Aber auch bei vier der übrigen Probanden ließ die Leistung im Nebel in wenigstens einer Laufrichtung deutlich nach. Bei zwei anderen nahm sie dagegen auch im Nebel zu.

Die beobachtete Leistungsänderung korrelierte nicht mit der am Ende des Trainings gezeigten Leistung (Korrelationskoeffizient KK für den Hinweg 0.22, für den Rückweg -0.38 , für beides gemeinsam -0.08). Die drei Probanden mit fehlplatziertem Feeder wurden bei dieser und den folgenden Auswertungen ausgenommen). Ein starker Leistungseinbruch im Nebel ist also genauso möglich wie eine Verbesserung, unabhängig davon, ob der Proband zuvor sicher durch die Umgebung navigierte oder noch große Unsicherheiten zeigte. Dagegen bestand eine schwache Korrelation (KK 0.66) zwischen dem Ausmaß, in dem eine Versuchsperson im Mittel vom Nebel beeinflusst wurde, und der mittleren Ähnlichkeit ihrer letzten Trainingstrajektorien: je konstanter die im Training etablierte Route war, desto geringer war die Auswirkung des Nebels auf die Leistung (vgl. Abbildung 4.2, Seite 51).²⁶ Es fällt auf, dass Hin- und Rückweg eines Probanden sich vollkommen unterschiedlich, sogar gegensätzlich verhalten können. Besonders deutlich war dieser Unterschied bei TK23 zu sehen. In nebenstehender Abbildung 35 sind alle Trajektorien dieses Probanden eingezeichnet (großes Bild). Zum Vergleich sind im kleinen Bild die letzten Trainingstrajektorien desselben Probanden gezeigt. Auf dem im Training konstanten Hinweg (rot) konnte er auch im Nebel einer festen Route folgen, auf dem im Training variablen Rückweg (blau) dagegen verlief er sich in fünf von zehn Fällen.

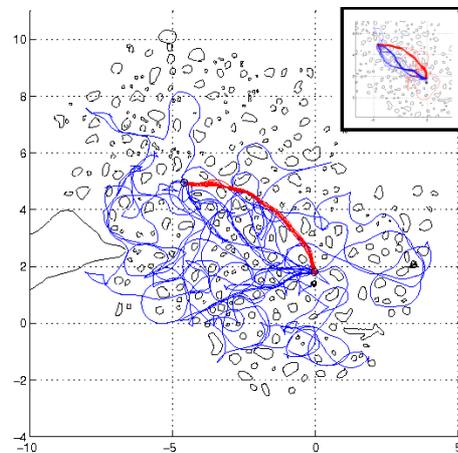
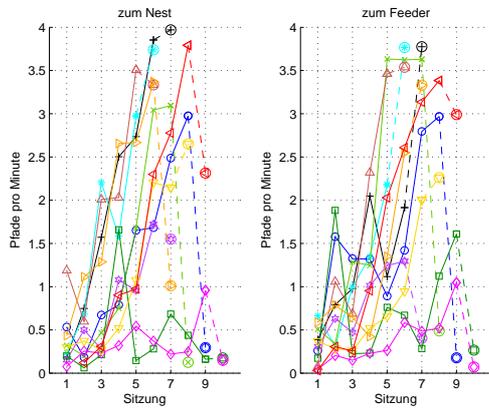
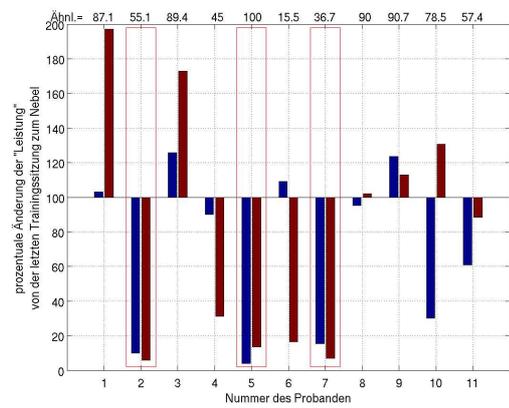


Abbildung 35: Trajektorien im Nebel (großes Bild) und im letzten Training (kleines Bild) von TK23. Hinwege zum Feeder in rot, Rückweg zum Nest in blau eingezeichnet.

²⁶Werden der Hinweg zum Feeder und der Rückweg zum Nest nicht gemeinsam, sondern getrennt betrachtet, liegt der Korrelationskoeffizient für die Hinwege bei 0.67, für die Rückwege sogar bei 0.74.



(a) Probanden einzeln



(b) durchschnittliche Entwicklung: Änderung

Abbildung 36: Vergleich der "Leistung" der einzelnen Probanden (gemessen als Anzahl der im Sitzungsmitel pro Minute gelaufenen Pfade) beim normalen Training und im Nebel. Die beiden linken Abbildungen (a) zeigen die Entwicklung der Leistung während des Trainings (Trainingsläufe sind mit durchgezogenen Linien verbundenen), sowie im Nebel (gestrichelte Verbindung zum letzten Trainingspunkt und zusätzlicher Kreis um Datenpunkt). Die Probanden mit falschem Ziel sind blau-Kreis, hellgrün-Kreuz und rosa-Raute. Links sind die Werte zum Nest gezeigt, rechts die zum Feeder. In b wird die "Leistung" im Nebel als prozentuale Veränderung der "Leistung" während der letzten Trainingssitzung dargestellt. (Berechnung als Nebelleistung/Trainingsleistung*100). Die drei Probanden mit verfälschter Zielposition sind rot umrandet. Das über der Abbildung angegebene Ähnlichkeitsmaß (mit *Ähnl.* bezeichnet) ist die mittlere Ähnlichkeit der Trajektorien der letzten Trainingssitzung. Es wurde separat für Pfade zum Nest und Pfade zum Feeder bestimmt und dann über beide Werte gemittelt.

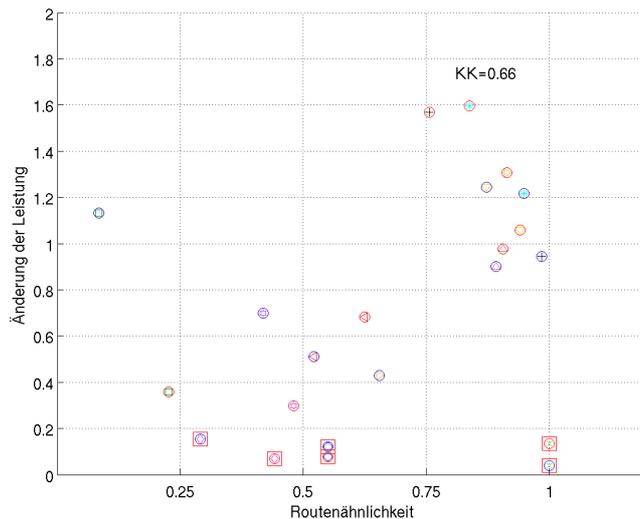


Abbildung 37: a: Änderung der Leistung im Nebel gegen Ähnlichkeit der letzten Trajektorien (Ähnlichkeitsmaß in Abbildung 36b). Probanden mit falscher Feederposition sind durch ein rotes Quadrat markiert, die Mittelwerte beim Laufen zum Nest blau und die beim Laufen zum Feeder rot umkreist. Ansonsten entsprechen Farben und Markerform der Probandencodierung.

4.3 Diskussion

In diesem Teil des Versuches sollten die Probanden zwischen den beiden bereits aus dem Training bekannten Zielpositionen hin und her navigieren. Der Unterschied zum Training bestand darin, dass durch die Einführung von "Nebel" die Sichttiefe begrenzt war. Alle globalen Landmarken verschwanden, größere Anordnungen von Hindernissen wie Fluchten wurden deutlich eingeschränkt.

Beeinflussung der Leistung durch die reduzierte Sichttiefe Wie stark die Probanden durch diese Verringerung der zur Verfügung stehenden Landmarken beeinflusst wurden, war individuell sehr unterschiedlich. Generell blieben Laufgeschwindigkeit und Pausen im Vergleich zum Training unverändert. Die Länge der Pfade jedoch war teilweise erheblich größer, die Anzahl der pro Minute vervollständigten Pfade also geringer als im Training. Dabei waren besonders die Probanden betroffen, die im Training variablen Strecken gefolgt waren. Demnach benötigten besonders diese Probanden für die Navigation weiter entfernt liegende Hindernisse und/oder globale Landmarken, während die Probanden mit konstanten Routen in der Lage waren, anhand der direkt am Weg liegenden Hindernisse zu den Zielpunkten zu finden.

Die Anzahl der pro Minute gelaufenen Pfade hing von der Geschwindigkeit und der Streckenlänge ab. Menschen neigen sowohl in realen wie in virtuellen Umgebungen dazu, bei abnehmendem Kontrast (wie das etwa bei Nebel der Fall ist) Geschwindigkeiten zu unterschätzen, was trotz der erschwerten Sicht dazu führt, dass man sich schneller bewegt (Stone und Thompson 1992; Snowden u. a. 1998). In dem vorliegenden Experiment wurde allerdings keine Änderung der Laufgeschwindigkeit beobachtet, tendenziell sind einzelne Probanden sogar eher langsamer als schneller gelaufen. Es wurde nicht überprüft, wie stark der Kontrast durch den Nebel abnahm. Scheinbar überwog hier die Unsicherheit durch die verminderte Sichttiefe die durch die Abnahme des Kontrastes induzierte Fehleinschätzung der Eigengeschwindigkeit. Davon abgesehen bewegten sich drei Probanden (AN19, BG27, SN23) nahezu mit Maximalgeschwindigkeit, in diesen Fällen war also keine weitere Steigerung möglich. Ebenso veränderten sich weder die Pausenhäufigkeit noch deren Dauer im Vergleich zum Training, die Probanden ließen sich also nicht mehr Zeit für eine bessere Orientierung.

Da die Geschwindigkeit durch den Nebel im Mittel nicht beeinflusst wurde, bestimmte allein die Streckenlänge die Veränderung der Leistung. Diese Streckenlänge änderte sich besonders stark, wenn ein Proband sich verlor. Die Navigation im Nebel konnte nicht auf weiter entfernten Landmarken, seien es nun entferntere Hindernisse, größere Konstellationen aus Hindernissen oder globale Landmarken, basieren, da diese nicht mehr dargestellt wurden. Besonders erfolgreich waren also jene Probanden, die entweder in der Lage waren, ausschließlich lokale Landmarken der unmittelbaren Umgebung zu verwenden, oder überhaupt nicht auf Landmarken angewiesen waren. Der im Training erreichte Lernstand, gemessen an der dort gezeigten Anzahl pro Minute vervollständigter Pfade, lies keine Voraussage darauf zu, wie stark die Navigation eines Probanden entlang der jeweils erlernten Routen durch den Nebel beeinträchtigt werden würde. Ein Proband konnte im Nebel deutlich nachlassen (wie das bei TK23 - orangefarbenes Dreieck nach vorne - bei den Rückwegen zum Nest der Fall war) oder unbeeindruckt bleiben (SN23 - rote Dreiecke nach hinten), gleichgültig, ob er die Aufgabe im Training gut beherrschte oder nicht. Interessanterweise gab es jedoch einen linearen Zusammenhang zwischen der in der letzten Trainingssitzung erreichten Ähnlichkeit der Pfade und der Leistungsänderung im Training: Je größer die Routenähnlichkeit im Training gewesen war, desto geringer war die Beeinträchtigung der Leistung im Nebel. Demnach zeigten sich konstante Routen im Nebel robuster als variable. Probanden, welche eine konstante Route ausgebildet hatten, waren also eher in der Lage, sich an lokalen Landmarken der unmittelbaren Umgebung entlangzuhangeln, während Probanden mit variablen Routen stärker auf weiter entfernte Landmarken angewiesen waren.

Repräsentation der Umgebung Eine Navigation entlang einer bekannten Strecke kann in der virtuellen Umgebung außer auf optischen Landmarken nur auf dem optischen Fluss und der Auslenkung der Steuerhebel des Joypads beruhen. Eine Reproduktion der Trainingsroute allein anhand des optischen Flusses wurde jedoch vermutlich dadurch erschwert, dass erstens die weiter entfernt liegenden Bereiche kontrastärmer waren als im Training und zweitens der Boden gänzlich die Textur verlor. Damit ging ein wichtiger Beitrag zum optischen Fluss verloren (Kearns u. a. 2002, Peruch u. a. 1997). Eine Reproduktion der Trainingsroute allein anhand des optischen Flusses sollte dadurch erschwert sein. Die Probanden gaben jedoch an, dass weder die fehlende Textur noch das gelegentliche Aufflackern derselben irritierten. Des Weiteren verlassen sich Menschen nach Foo et al. (Foo u. a. 2005) eher

auf Landmarken, wenn solche vorhanden sind, als etwa auf Wegintegration zurück zu greifen. Beides spricht gegen eine rein auf dem optischen Fluss basierende Strategie.

Stimulus-Response-Sequenzen (vgl. Trainingsdiskussion, Kapitel 3.3, Seite 45) könnten im Nebel erfolgreich bleiben, vorausgesetzt, die erforderlichen Stimuli basieren auf lokalen Landmarken und auch für die Rotationen sind keine Informationen von weiter entfernten Punkten notwendig. Auch eine Strategie wie die von Cornell (Cornell u. a. 1994) beschriebene (vgl. Kapitel 3.3, Seite 43) wäre denkbar. Hierbei wären die Probanden, die im Training vorwiegend einer konstanten Route gefolgt sind, gegenüber den Probanden mit variablen Routen im Vorteil, da die Unterschiede zwischen bekannten und weniger bekannten Ansichten durch die eingeschränkten bisherigen Erfahrungen trotz der eingeschränkten Sicht größer sein dürften. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass Probanden mit konstanten Trainingsrouten weniger empfindlich auf Nebel reagierten als Probanden mit variablen Routen.

Die sehr konstanten Trainingsrouten einzelner Probanden (allen voran FW23) könnten durch die ständige Wiederholung im Training letztlich zur Ausbildung eines Motorprogrammes der notwendigen Hebelauslenkungen am Joypad für diese Strecken geführt haben. Von der Initialrichtung des ersten Durchganges abgesehen,²⁷ könnte dieses im Extremfall rein auf der Auslenkung der Steuerhebel beruhen. Zusätzlich bildeten die nächstgelegenen Hindernisse nach wie vor Bezugspunkte, die als Korrekturhilfen eines solchen Motorprogrammes herangezogen werden konnten. Allerdings zeigte gerade die Route von FW23 (falsche Feederposition, daher ist nur der erste Durchgang zum Feeder überhaupt zu betrachten) überhaupt keine Ähnlichkeit zu den Trainingstrajektorien. Derart konstante Trajektorien kamen allerdings nur selten vor, weshalb diese Hypothese weder klar abgelehnt noch gestützt werden kann. Ein etabliertes Motorprogramm sollte es eigentlich ermöglichen, auch ohne die gewohnten Landmarken die gewohnte Route zu reproduzieren, vorausgesetzt, dass die Initialrichtung festgestellt werden kann. Auch derartige Motorprogramme könnten die Unterschiede zwischen Probanden mit variablen Trainingsrouten (die vermutlich keinem festen Motorprogramm folgen konnten) und konstanten Trainingsrouten erklären. Allerdings sollte dann auch ein Zusammenhang zwischen der im Training zuletzt gezeigten Leistung und der Nebelempfindlichkeit nachzuweisen sein, da Probanden mit guter Trainingsleistung die Route tendenziell häufiger abgelaufen haben als solche mit schlechter Endleistung, was die Güte eines Motorprogrammes verbessern sollte - oft wiederholte Bewegungen sitzen einfach sicherer, auch wenn sie bereits nach wenigen Wiederholungen korrekt ausgeführt werden konnten. Auch im folgenden, landmarkenlosen Versuch sollten Motorprogramme dazu führen, dass die erlernten Routen (möglicherweise allerdings verzerrt und von einer falschen Initialrichtung ausgehend) reproduziert werden können.

Durch wiedererkannte Landmarken läßt sich die Einschätzung der eigenen Position korrigieren (englisch *Piloting*, Cornell und Heth 2003), vorausgesetzt, die erkannte Landmarke wurde bereits mit einem Vektor zu anderen bekannten Plätzen verknüpft, oder ihre Position ist in einem globalen Referenzrahmen bekannt (die Landmarke ist also in einer kognitiven Karte "vermerkt"). Das erfolgreiche Verwenden lokaler Hindernisse als Landmarken in der Nebelsituation muss nicht zwangsläufig bedeuten, dass dieselben Landmarken auch im Training bereits verwendet wurden. Ebenso ist denkbar, dass insbesondere die Probanden mit konstanten Routen diese bereits so oft abgelaufen waren, dass sie die Hindernisse am Weg gut genug kannten, um im Nebellauf auf sie zurückgreifen zu können, ohne sie vorher ebenfalls dazu genutzt zu haben (passives Lernen). In diesem Fall sollte allerdings ein Zusammenhang zur letzten Trainingsleistung erkennbar sein: Je häufiger der Weg tatsächlich gelaufen worden war, desto sicherer sollten die Probanden auch im Nebel sein, unabhängig von der Konstanz ihrer Routen. Ein solcher Zusammenhang konnte nicht gefunden werden, auch eher unsichere Probanden mit wenig Routenerfahrung waren in der Lage, die einzelnen Landmarken zu erkennen. Auch hier muss allerdings wieder auf den sehr begrenzten Stichprobenumfang²⁸ hingewiesen werden.

Von Interesse ist auch, dass Probanden in den beiden Laufrichtungen unterschiedlich große Schwierigkeiten mit der reduzierten Sichttiefe hatten. Derartige laufrichtungsabhängige Unterschiede sprechen dafür, dass Hin- und Rückweg separat gelernt werden und ein Proband für die beiden Laufrichtungen unterschiedliche Landmarkentypen oder möglicherweise sogar unterschiedliche Strategien nutzen kann, wobei manchmal eher lokale und manchmal eher globale oder zumindest weiter entfernt liegende Landmarken eine Rolle spielen. Dadurch reagiert ein und derselbe Proband unterschiedlich empfind-

²⁷Die Initialrichtung ist ein Sonderfall, da die "Blickrichtung" am Nest zu Beginn des Experimentes nicht der hauptsächlich trainierten Ausrichtung nach dem Erreichen des Nestes während des Training entspricht.

²⁸Sieben tatsächlich verwendbare Datensätze; von elf Probanden hatte einer noch keine Route etabliert, bei drei weiteren war eine Zielposition verfälscht, darunter die beiden Probanden mit den deutlichsten konstanten (FW23) bzw. variablen (AS25) Routen

lich auf eine Reduktion der Sichttiefe.

Folgender Versuch Im folgenden Versuchsteil sollte untersucht werden, wie exakt eine Navigation ganz ohne lokale Hindernisse ausfiel. Bestehende Motorprogramme etwa sollten es den Probanden ermöglichen, ohne Landmarken ihre gewohnte Route grob zu wiederholen. Alle auf lokalen Landmarken basierende Strategien, wie Stimulus-Response oder der Navigation nach Bekanntheit verschiedener Ansichten, sollten dagegen nicht direkt angewendet werden können. Es sollte jedoch möglich sein, wenn eine grobe Übersicht über die erlernte Strecke erlernt wurde, oder die Route "im Geist" abgelaufen werden kann, diese auch ohne Hindernisse zu reproduzieren. Basierend auf einer derartigen Übersicht oder auf Wegintegration könnte allerdings auch eine neue, direktere Route generiert werden, da durch das Fehlen der Hindernisse keinerlei Ausweichbewegungen mehr vorgenommen werden müssten.

5 Navigation ohne lokale Landmarken

5.1 Fragestellung und Durchführung

In diesem Teil des Versuches wurden, nachdem die Probanden erfolgreich den Feeder erreicht hatten, sämtliche lokalen Landmarken entfernt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, zum Nest zurück zu navigieren. Der Zielpunkt wurde dabei nicht mehr sichtbar, die Probanden sollten durch Knopfdruck anzeigen, wann sie ihrer Meinung nach das Nest erreicht hatten. Danach wurde der Proband an den Anfang zurückgesetzt und die lokalen Landmarken erschienen wieder. Der Versuch wurde drei Mal hintereinander durchgeführt. Der Proband erhielt keinerlei Informationen über die Richtigkeit seiner vorangehenden Schätzungen. Auch in diesem Teil des Experimentes erhielten die Probanden vor Beginn ein Informationsblatt, das den Ablauf des Versuches schilderte (vgl. Anhang C.5). Es wurden keine ablenkenden Aufgaben (beispielsweise Rechenaufgaben) gestellt, um ein Zählen der "Schritte" und Ähnliches zu verhindern. Die Probanden wurden zu der von ihnen gewählten Strategie nicht befragt.²⁹ Die Auswertung erfolgte aufgrund der Trajektorien.

Dabei wurden folgende Fragen gestellt:

Sind die Probanden in der Lage, ohne lokale Landmarken wieder zum Nest zurück zu finden?

Wie exakt sind ihre Schätzungen des Rückweges, gleich, ob sie nun auf Wegintegration, reproduzierten Motorprogrammen oder anderen Strategien basieren?

Lassen sich auch Aussagen über die verwendeten Strategien treffen?

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Trajektorien

Die Trajektorien³⁰ lassen sich anhand ihrer Form in unterschiedliche Kategorien einteilen. Die Spur konnte entweder geradlinig auf das Ziel zu führen, oder es wurde eine bekannte Route reproduziert. Hierbei konnte entweder der gerade genutzte Weg vom Nest zum Feeder oder der im Training gezeigte Rückweg als Vorlage dienen. Die Einteilung der einzelnen Probanden ist in Tabelle 5 auf Seite 57 aufgelistet. Bei fünf Probanden verlief wenigstens einer der drei Durchgänge geradlinig. Darunter waren zwei Probanden mit variablen Trainingsrouten und drei Probanden mit konstanten Trainingsrouten (auch EH23, der für die Hinwege variablen, für die Rückwege konstanten Pfaden folgte). Bei sieben Probanden ähnelte der Verlauf des ohne lokale Landmarken gewählten Weges dagegen dem im Training etablierten Rückweg (vgl. Abbildung 38a, Seite 56). Bei vier dieser Probanden waren Hin- und Rückweg allerdings so ähnlich, dass sie nicht unterschieden werden konnten (vgl. Abbildung 38b). In einem Fall (SP20, vgl. Abbildung 38c) sind die Trainingsrouten so nah an der geradlinigen Verbindung der beiden Zielpositionen, dass nicht unterschieden werden kann, ob der Proband den Hin- oder Rückweg reproduzierte, oder einer Art "Heimvektor" folgte. Sechs dieser sieben Probanden hatten, zumindest in einer Richtung, konstante Trainingsrouten etabliert, der siebte jedoch (TS21) hatte variable Trainingsrouten. Bei allen Probanden bis auf einen war die Form der Rückwege in allen drei Durchgängen vergleichbar (obwohl IW25 durch fehlende Routenkenntnis freilich ganz unterschiedlichen Wegen folgte, waren alle drei Strecken sehr kurvig). Bei SN23 (Abbildung 38b) dagegen ließen sich verschiedene Varianten unterscheiden: während der erste und letzte Durchgang den Knick des Routenverlaufes im Training nachvollzog, war der zweite Durchgang ganz geradlinig. Die meisten Probanden liefen eine gewisse Strecke und bestätigten dann ihre Position. Zwei Probanden (EH23, SM22) korrigierten diese Position dagegen durch Zurücklaufen (vgl. Abbildung 39, Seite 57).

5.2.2 Unterstützende Strategien

Die Probanden wandten unterschiedliche Strategien an, um ihre internen Repräsentationen der zu bewältigenden Route zu unterstützen. Da sie bereits im Vorfeld über den genauen Ablauf des Experimentes informiert waren, war es ihnen theoretisch bereits im ersten Durchgang möglich, derartige

²⁹ Einige Probanden kommentierten ihr Vorgehen jedoch während des Experimentes, so dass hier zusätzliche Informationen vorhanden sind.

³⁰ Alle Trajektorien sind auch in Anhang D.2.3 dargestellt.

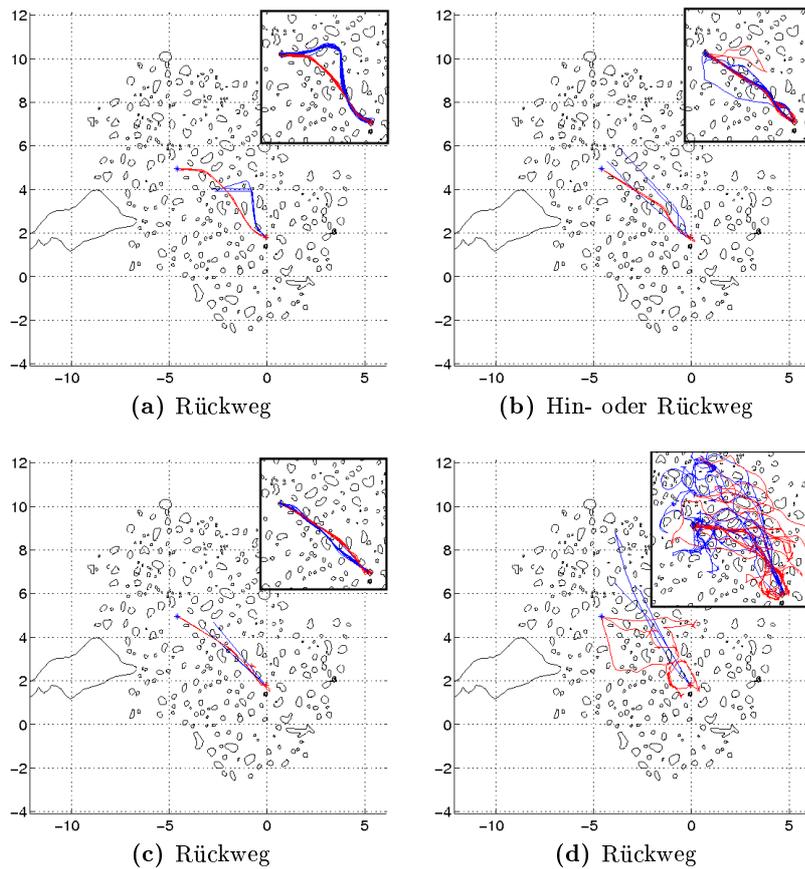


Abbildung 38: Beispieltrajektorien für die Navigation ohne lokale Landmarken. Proband FW23 (a) reproduzierte den im Training üblichen Rückweg. Dabei unterschätzte er die Länge der Teilstrecken, doch die Form blieb sehr charakteristisch. SN23 (b) folgte in der hindernisfreien Umgebung im ersten und dritten Durchgang den normalen Trainingsrouten, im zweiten Durchgang dagegen lief er geradlinig auf das Ziel zu. In Abbildung c (SP20) ist ein Beispiel für ein geradliniges Zurücklaufen gegeben. Allerdings kann in diesem Fall nicht unterschieden werden, ob der Proband den im Training üblichen Wegen folgte, oder (beispielsweise mittels Wegintegration) auf direktestem Weg zum Startpunkt zurück navigierte. d zeigt ein klares Beispiel für geradliniges Navigieren, der Proband (SM22) korrigierte am Ende der Trajektorie in einem Durchgang nochmals. In allen Abbildungen ist der Weg zum Feeder (mit lokalen Landmarken) in rot, der zurück zum Nest (ohne lokale Landmarken) in blau eingezeichnet, in den kleinen Ausschnitten sind jeweils die Trajektorien der letzten Trainingssitzung des Probanden dargestellt.

Tabelle 5: Charakterisierung der Rückwege bei der Navigation ohne lokale Landmarken im Vergleich zu den Trajektorien der letzten Trainingssitzung.

Ein + bedeutet, dass die in der zweiten Zeile genannte Beschreibung für die Trajektorien des in der ersten Zeile genannten Versuches zutrifft, ein -, dass sie nicht zutrifft. Pro Durchgang in der hindernislosen Umgebung ist eine Klassifikation angegeben. *Hin* und *Rück* beziehen sich jeweils auf den Hin- und Rückweg der letzten Trainingssitzung.

Proband	Ohne lokale Landmarken			Training				
	Rück	gerade	Korrektur	Hin=Rück	gerade		konstant	
					Hin	Rück	Hin	Rück
AN19	+++	---	---	-	-	-	+	+
AS25	---	+++	+--	-	-	-	-	-
BG27	+++	---	---	+	-	-	+	+
EH23	---	+++	+--	-	-	-	-	+
FW23	+++	---	---	-	-	-	+	+
IW25	---	---	---	-	-	-	-	-
SM22	---	+++	-+-	-	-	-	-	-
SN23	+ - +	- + -	---	+	-	-	+	+
SP20	+++	+++	---	+	+	+	+	+
TK23	+++	---	---	-	-	-	+	-
TS21	+++	---	---	+	-	-	-	-

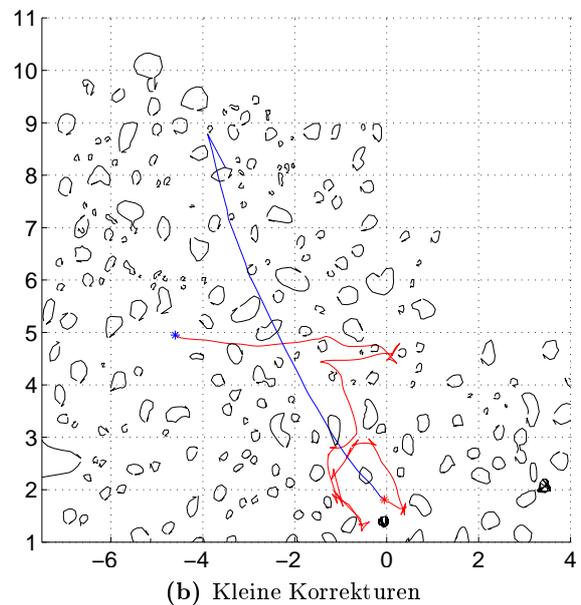
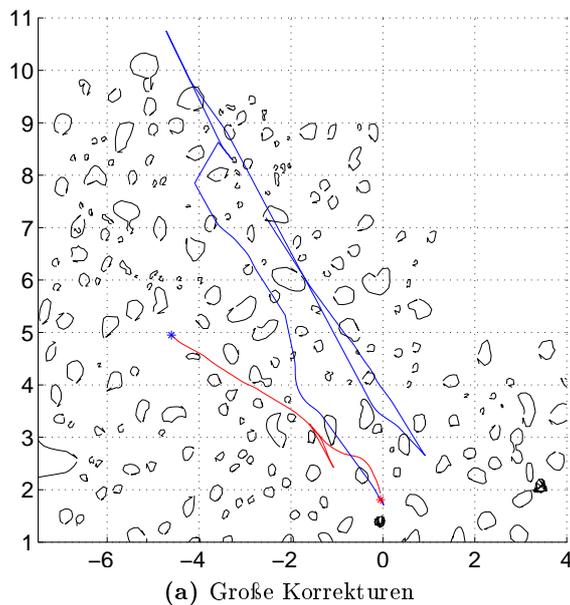


Abbildung 39: Korrektur der Position. Im ersten Fall (a) wurde gewissermaßen die gesamte Route wiederholt, allerdings mit einem lateralen Versatz relativ zur Ausgangsposition (Feeder). Trajektorie von EH23, Durchgang 2. Im zweiten Fall (b) dagegen lief der Proband nur ein kleins Stück zurück. Trajektorie von SM22, Durchgang 2.

In jeder Abbildung ist der Weg zum Feeder (mit lokalen Landmarken) in rot, der zurück zum Nest (ohne lokale Landmarken) in blau eingezeichnet.

Strategien anzuwenden. Tatsächlich wurden sie aber erst ab dem zweiten Durchgang verwendet. Die häufigste Strategie (fünf der elf Probanden) bestand darin, sich bereits vor dem Betreten des Feeders, also bevor die Hindernisse verschwanden, zum Nest auszurichten, um dann anschließend den Rückweg zum Nest ohne weitere (hindernislose) Ausrichtung beginnen zu können. Eine typische, aus einem solchen Manöver resultierende, Trajektorie ist in Abbildung 40a, Seite 59 gezeigt.³¹

Eine weitere Strategie war das Abschätzen der Streckenlänge durch ein Abzählen der "Schritte". Die Schritte können zählbar gemacht werden, indem der Vorwärts-Hebel des Joypads ständig nur ganz kurz ausgelenkt wird. Diese Variante wurde in einem Fall beobachtet, läßt sich jedoch leider nicht in den Trajektorien nachvollziehen. Die Zeit, die für eine bestimmte Strecke benötigt wurde, konnte auch ganz direkt abgeschätzt werden ("Sekundenzählen"). Ein Proband (BG27) unterteilte bereits den Hinweg in Abschnitte, indem er nötige Rotationen nicht über eine längere Strecke verteilte, sondern im Stehen rotierte. Er bestimmte die Zeit zwischen den resultierenden Drehpunkten und schaffte es mit dieser Strategie, sehr exakt zum Ausgangsort (Nest) zurück zu finden (vgl. Abbildung 40b). Anstatt die Strecke zu unterteilen, kann auch die Gesamtzeit bestimmt werden. Dies ist allerdings nicht an der Trajektorie zu erkennen. Da zumindest zwei Probanden während dem Experiment laut zählten (BG27 und SN23), ist sicher, dass auch diese Variante angewandt wurde. Einer der beiden versuchte, die normalerweise gemachten Kurven zu reproduzieren (BG27; bei ihm sahen Hin- und Rückweg im Training gleich aus, daher läßt sich nicht sagen, an welcher Richtung er sich dabei orientierte). Die resultierende Trajektorie ist in Abbildung 40c dargestellt. Der andere dagegen lief ganz geradlinig (vgl. Abbildung 40d), obwohl er sowohl auf dem gerade zurückgelegten Weg zum Feeder als auch im Training (auf beiden Strecken, die auch bei ihm identisch verliefen) Kurven machte.

5.2.3 Fehler

Wie exakt die Probanden sich dem Ziel näherten, wurde anhand dreier Fehlertypen beurteilt.

1) Der **Distanzfehler** gibt den euklidischen Abstand zwischen dem Endpunkt der Trajektorien und dem eigentlichen Ziel (dem Nest) an. Er lag im Mittel (alle Auswertungen ohne IW25) bei $1.7 \text{ EE} \pm 1.1 \text{ EE}$ (nur geradlinige Trajektorien gemittelt: $1.97 \text{ EE} \pm 0.69 \text{ EE}$ Standardabweichung, nur Routenreproduzierer: $1.50 \text{ EE} \pm 0.79 \text{ EE}$ Standardabweichung).

2) Der **Streckenfehler** gibt die Differenz zwischen der Distanz zwischen Start- und Endpunkt der Trajektorie und der Distanz zwischen Start- und Zielpunkt. Hier lag der Mittelwert bei $-0.66 \text{ EE} \pm 1.05 \text{ EE}$, die tatsächliche Strecke (5.5 EE) wurde im Mittel also um knapp 4% unterschätzt (geradlinig: $-0.45 \text{ EE} \pm 0.85 \text{ EE}$ Standardabweichung; Route: $-0.86 \text{ EE} \pm 0.81 \text{ EE}$).

3) Für den **Winkelfehler** wird die Initialrichtung, also die Richtung, in die der Proband losgelaufen ist, mit der Idealrichtung direkt zum Zielpunkt verglichen. Dieser Fehler lag bei $14.6^\circ \pm 11.6^\circ$ (gerade: $-7.42^\circ \pm 20.29^\circ$ Standardabweichung; Route: $1.06^\circ \pm 7.22^\circ$ Standardabweichung). Um anfängliche Korrekturen mit einzubeziehen, wurde die Initialrichtung in einem Abstand von 0.4 EE vom Startpunkt (Feeder) bestimmt.

Alle drei Fehlertypen sind für die einzelnen Probanden mit den individuellen Mittelwerten in Abbildung 41 auf Seite 60 angegeben.

5.3 Diskussion

Repräsentation In diesem Versuchsteil konnten die Probanden ihre Navigation nicht auf lokale Landmarken stützen, da diese, nachdem der Feeder erreicht worden war, entfernt wurden. Dies sollte dazu führen, dass nur von lokalen Landmarken unabhängige Strategien erfolgreich sein konnten. Eine mögliche derartige Strategie beruht darauf, dass das Ergebnis einer bereits auf dem Weg vom Nest zum Feeder stattfindenden Wegintegration (ein Vektor, der Richtung und Entfernung zum Startpunkt angibt) genutzt wird. Eine andere Möglichkeit wäre, den verlangten Rückweg aufgrund von während des Trainings gesammelten Informationen (in Form einer kognitiven Karte oder eines Überblicks über den Routen-Verlauf) zu erschließen. Beide Varianten sollten es ermöglichen, den Weg zurück zum Nest

³¹Es ist auch möglich, vor Erreichen des Feeders solange zu rotieren, bis die Blickrichtung der Richtung entspricht, aus der man kommt und in die man unter Umständen anschließend wieder loslaufen möchte. Der Feeder wird dann "im Rückwärtsgang" angelaufen. In einem solchen Fall ist höchstens ein Knick in der Trajektorie zu erkennen. Hier wäre eine Auswertung der Blickrichtung bei Erreichen des Feeders notwendig, um zu erkennen, ob ein Proband die Richtung im Vorfeld korrigiert hat, oder nicht. Eine solche Auswertung wurde allerdings nicht vorgenommen. Daher ist es möglich, dass die Korrektur der Initialrichtung noch häufiger vorkam als oben beschrieben.

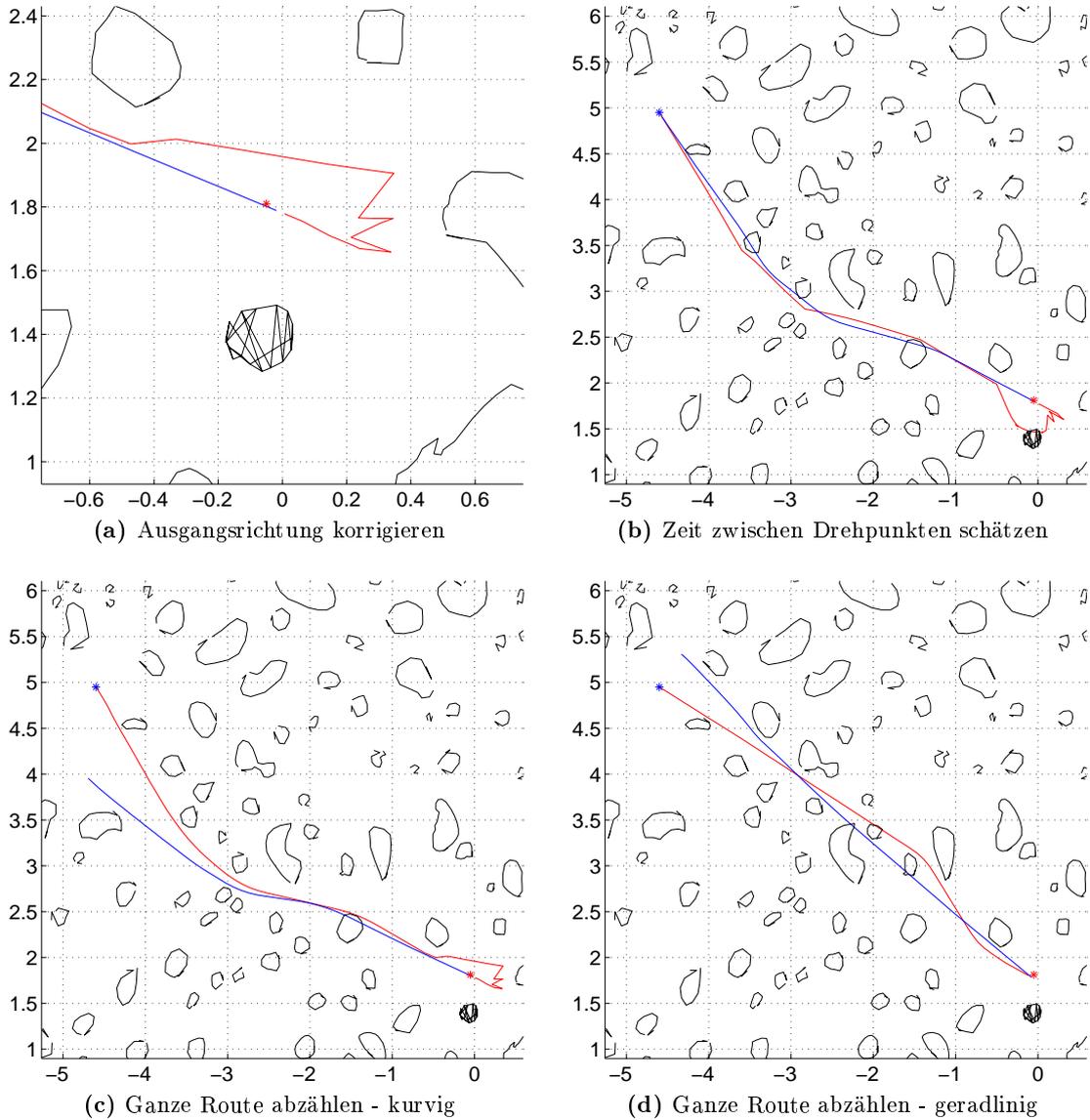


Abbildung 40: a: Trajektorie, die durch die Korrektur der Ausgangsrichtung entsteht. Bevor der Feeder erreicht wird, richtet der Proband sich so aus, dass er vom Feeder aus Richtung Nest geradeaus weiterlaufen kann. Trajektorie von BG27, Durchgang 2. b: Beispiel für eine Trajektorie, bei welcher die Zeit zwischen den Rotationen mitgezählt wurde. Man beachte die scharfen Knicke in beiden Richtungen. Trajektorie von BG27, Durchgang 3. c und d: Trajektorien, bei denen die Probanden die Streckenlänge durch Mitzählen der Gesamtzeit abgeschätzt haben. Während der Rückweg in c kurvig ist (Trajektorie von BG27, Durchgang 2), verläuft er in d geradlinig (Trajektorie von SN23, Durchgang 2). In jeder Abbildung ist der Weg zum Feeder (mit lokalen Landmarken) in rot, der zurück zum Nest (ohne lokale Landmarken) in blau eingezeichnet.

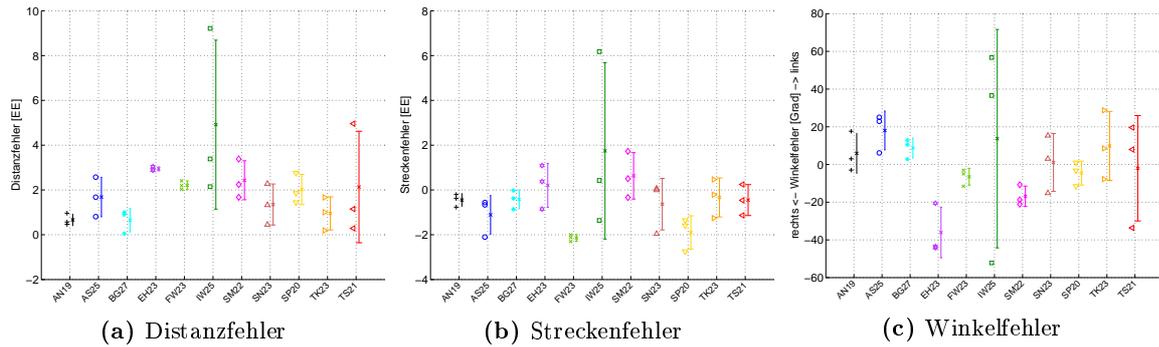


Abbildung 41: Fehler der Probanden bei der Navigation ohne lokale Landmarken. Pro Proband sind die drei Einzelmessungen sowie der zugehörige Mittelwert (Kreuzchen) \pm Standardabweichung dargestellt. **a:** Distanzfehler. Abstand zwischen Endpunkt der Trajektorie und Zielpunkt (Nest). **b:** Streckenfehler. Differenz zwischen der gelaufenen Strecke (bestimmt als euklidische Distanz zwischen Start- und Endpunkt der Trajektorie) und der idealen Strecke (euklidische Distanz zwischen Start- (Feeder) und Zielpunkt (Nest)). Zu weite Strecken resultieren also in positiven Fehlern, zu kurze in negativen. **c:** Winkelfehler. Abweichung der Initialrichtung (gemessen mit 0.4 EE Abstand vom Feeder) von der Idealrichtung zum Nest. "Links" und "Rechts" bezieht sich dabei auf die Blickrichtung vom Feeder zum Nest. Navigiert man zu weit nach "rechts" (auf die blaue globale Landmarke zu, vgl. Abbildung 2, Seite 14), ist der resultierende Winkelfehler negativ.

geradlinig abzulaufen. Dem geraden Weg standen auch keinerlei Hindernisse im Weg. Reale Laufbewegungen bei Menschen sind immer mit seitlichen Drifts und Kurven verbunden (engl. *veering*, siehe dazu beispielsweise Kallie u. a. 2007, Boyadjian u. a. 1999, Dickstein u. a. 2005). Diese können durch visuelle Kontrolle ausgeglichen werden, so dass letztlich eine meandernde Trajektorie entsteht (Uetake 1992). In der hier verwendeten virtuellen Umgebung war es durch die Navigation mittels Joypad dagegen sehr einfach, geradeaus zu laufen (zwei getrennte Hebel für Rotation und Translation), so dass etwaige seitliche Drifts und ähnliches als absichtliche Korrekturen betrachtet werden können. Während bei realen Bewegungen verschiedenste Informationen über die Eigenbewegung für die Wegintegration zur Verfügung stehen (für Menschen neben visuellen auch beispielsweise vestibuläre und propriozeptive, möglicherweise auch akustische und haptische) ist die Wahrnehmung im Desktop-Experiment weitgehend auf visuelle Informationen beschränkt. Möglicherweise können noch die Motorefferenzen der Joypadbedienung genutzt werden und bei einigen Probanden wurde das vestibuläre Organ ansatzweise gereizt, da sie virtuell durchgeführte Drehungen auch real auf dem Drehstuhl andeuteten: In jedem Fall aber sind die Informationen anders als bei einer normaler Bewegung durch eine reale Umgebung. Eine Reihe von Experimenten zur Wegintegration beim Menschen in virtuellen Umgebungen belegen jedoch, dass Wegintegration allein aufgrund von visuellen Eindrücken möglich ist (beispielsweise Bremmer und Lappe 1999, Kirschen u. a. 2000, Kearns u. a. 2002, Gramann u. a. 2005, Wiener und Mallot 2006).

Fünf Probanden folgten geradlinigen Routen, welche möglicherweise auf Wegintegration basierten. Andere Trajektorien zeigten jedoch, dass den Probanden noch weitere Strategien zur Verfügung gestanden haben müssen. Sieben Probanden folgten Trajektorien, die ihren im Training etablierten Routen sehr ähnlich sahen.³² Diese reproduzierten Routen veranschaulichen, weshalb die Ergebnisse dieses Versuches so schwer mit anderen Arbeiten zur Wegintegration zu vergleichen sind. Zum einen konnte jeder Proband für sich entscheiden, welcher genauen Route er folgen wollte, so dass weder eine klare Streckenlänge, noch ein fester Drehwinkel zur Verfügung steht, zu welchen die beobachteten Fehler in Bezug gesetzt werden können. Zum anderen verfügten die Probanden durch das vorangehende Training über gute Routenkenntnisse, welche sie auch in der landmarkenlosen Situation nutzen konnten.

³²IW25 konnte hier nicht zugeordnet werden. Er folgte in allen drei Durchgängen kurvigen Routen, die letztlich den Trainingsrouten in so fern ähnelten, als weder im Training noch in der hindernislosen Umgebung eine ansatzweise zielgerichtete Linie feststellbar war. Er griff demnach nicht auf Wegintegration zurück, obwohl er nicht über eine etablierte Trainingsroute verfügte. Etchamendy et al. (Etchamendy und Bohbot 2007) beschrieben einen Unterschied zwischen "guten" und "schlechten" Navigierern, den sie darauf zurückführten, dass die "guten" je nach Anforderungen der gestellten Aufgabe unterschiedliche Strategien anwandten, während die "schlechten" sich entweder durchgehend auf eine Variante verließen oder sogar die unpassendere wählten. Auch IW25 zeigte Anpassung des eigenen Verhaltens an die gestellte Aufgabe.

Zwei Probanden sind hier doppelt aufgeführt. Einer hatte geradlinige Trainingsrouten (TS21) und demonstrierte damit, dass es unmöglich ist, zugrundeliegende Strategien allein aufgrund der Trajektorienform eindeutig abzuleiten. Der andere (SN23) zeigte bei seinen drei Durchgängen zwei Routenreproduktionen und eine geradlinige Trajektorie. Hier wird deutlich, dass er zwischen unterschiedlichen Strategien wählen konnte. Foo u. a. (2005) beschreiben, dass Menschen sich, wenn sie die Wahl haben, eher auf Landmarken verlassen, als auf grobes Übersichtswissen oder Wegintegration zurück zu greifen. Dennoch folgten vier der fünf Probanden mit geradlinigen Trajektorien einer neuen, bisher unerprobten Strecke, die anhand von zuvor erlangtem Übersichtswissen oder Wegintegration generiert worden sein mußte. Die übrigen Probanden folgten dagegen altbekannten Wegen, die allerdings ohne die Überprüfung der eigenen Position mit Hilfe der Hindernisse verzerrt wurden. Alle fünf Probanden, die im Training für beide Richtungen konstante Routen etabliert hatten, gehörten in diese Gruppe. Auch einer der drei Probanden mit variablen Routen für Hin- und Rückweg sowie einer der beiden Probanden mit einer konstanten (zum Feeder) und einer variablen (zum Nest) Trainingsstrecke folgten Routen, die den Trainingsrouten ähnelten.³³ Demnach schienen sich besonders die Probanden mit konstanten Routen auf diesen sicherer zu fühlen als auf neu generierten Strecken. Dies liegt nahe, da sie sich den genauen Verlauf durch die exakten Wiederholungen vermutlich besser einprägen konnten als bei ständigen Variationen. Allerdings ist für eine klare Unterscheidung wiederum der Stichprobenumfang zu klein, besonders da in allen drei Gruppen (beide Trainingsstrecken konstant; eine konstant, eine variabel; beide variabel) in der hindernislosen Umgebung sowohl neu generierte als auch reproduzierte Routen vorkamen.

Die Generierung einer neuen Strecke in einer hindernislosen Umgebung könnte in dem hier durchgeführten Versuch zusätzlich erschwert gewesen sein, da Rotationen in diesem Aufbau sehr schwer einschätzbar waren. Allgemein ist es für Menschen schwieriger, Rotationen allein aufgrund visueller Informationen korrekt einzuschätzen als bei "realen" Bewegungen (vgl. Peruch u. a. 1997). Zusätzlich war die verwendete Umgebung schlecht angepasst. Das virtuelle Blickfeld war mit unfähr 90° deutlich größer als das reelle (ungefähr 30°). Außerdem wirkte die Umgebung verzerrt, so dass ein betrachtetes Objekt in "Blickrichtung" der virtuellen Kamera weiter entfernt erschien als in den seitlichen Bereichen. Dies wurde im Nebel besonders auffällig, da dann ein Objekt, das nicht sichtbar war, wenn direkt darauf zugesteuert wurde, im seitlichen Blickfeld erschien, wenn man eine Rotation am Platz durchführte. Viele Probanden beschwerten sich mündlich sowohl im Training als auch während des hindernisfreien Versuches darüber, dass kein Knopf für ein kontrolliertes Rotieren zur Verfügung stand ("ich will einen 180°-dreh-Knopf"). Manche Probanden umgingen dieses Problem, indem sie bewußt ihre Ausrichtung am Feeder bereits korrigierten, bevor sie den Feeder betraten, so dass sie wie im Training sowohl die globalen als auch die lokalen Landmarken zur Orientierung nutzen konnten.³⁴

Fehler Beide Strategien, die Generierung einer neuen, direkten Route sowie die Reproduktion einer altbekannten Route, führten zu ähnlichen Fehlern.

Ein Vergleich der hier gefundenen Fehler mit der Literatur ist aus verschiedenen Gründen schwierig. Wie bereits erwähnt, waren weder eine feste "Soll-Distanz" noch ein "Soll-Winkel"³⁵ vorgegeben. Durch die freie Routenwahl zeigte auch die Komplexität der Routen deutliche individuelle Unterschiede (von nahezu geradlinig wie bei SP20 bis sehr kurvenreich wie bei AS23). Die Komplexität scheint jedoch einen Einfluss auf die Exaktheit der Wegintegration zu haben, auch wenn bisher keine eindeutigen Ergebnisse dazu vorliegen, welcher Art dieser Einfluss ist. So fanden Wiener und Mallot (2006) keine Veränderung der Wegintegrationsfehler bei steigender Komplexität (hier definiert als Anzahl von geradlinigen Routensegmenten mit folgender Rotation) und konstant gehaltener Gesamtlänge und Gesamtrotation. Andere Arbeiten (beispielsweise Loomis u. a. 1993: reale Bewegung ohne visuelle Reize, variable Anzahl von geraden Segmenten mit verbindenden Rotationen oder Ruddle u. a. 1998: virtuelle Gebäude, Komplexität als Anzahl der Kurven) fanden dagegen eine Zunahme der Fehler mit

³³In diesen beiden Fällen war der Vergleich schwieriger als bei den Probanden mit konstanten Trainingsrouten. Hier musste eher die Krümmungsrichtung der Route als ihr genauer Verlauf verglichen werden, da die Trainingsrouten ja keine wirklich konstante Form hatten.

³⁴Möglicherweise wurde auch dadurch die Verwendung altbekannter Route gefördert, indem die Ausrichtung eben genau so wie im Training erfolgte. Ein Vergleich der im Vorfeld korrigierten Ausrichtung mit der zugehörigen Trainingsausrichtung bzw. der Richtung direkt zum Nest ist jedoch schwierig, da die Bereiche stark überlappten und oft wegen variabler Trainingsrouten keine eindeutige Trainingsausrichtung existierte.

³⁵So wurde der Winkelfehler im vorliegenden Versuch als Abweichung der Startrichtung von der Idealrichtung bestimmt, ohne zu beachten, dass der Proband möglicherweise nicht der direkten Verbindung, sondern einer kurvenreichen Route folgte.

steigender Komplexität. Hier wurden allerdings auch die Gesamtlänge sowie die Gesamtrotation verändert. Eine gemeinsame Betrachtung aller Probanden, unabhängig von der Komplexität ihres Weges zum Feeder (also zum Startpunkt der hindernislosen Strecke) fasst demnach gänzlich unterschiedliche Bedingungen zusammen, was wiederum den Vergleich mit anderen Arbeiten erschwert. Eine Unterscheidung würde hier allerdings dazu führen, dass jeder Proband nur für sich allein betrachtet werden kann.

Der insgesamt beobachtete Streckenfehler von 4% der Luftlinienverbindung zwischen Start und Zielpunkt erscheint sehr klein. Klatzky u. a. (1999) fanden bei realen Dreiecksvervollständigungen ohne visuelle Reize, dass sowohl der notwendige Drehwinkel als auch die Entfernung zum Startpunkt bei kleinen Winkeln bzw. Strecken unter-, bei großen dagegen überschätzt wurden. Dazwischen gab es einen Bereich, in welchem die Fehler minimal ausfielen. In dem vorliegenden Versuch wurden Strecken und Winkel nicht kontrolliert variiert. Zudem basierte die Bewegungswahrnehmung nicht auf kinestetischen und vestibulären Reizen, während visuelle Reize unterbunden wurden, wie bei dem Experimenten von Klatzky et al., sondern die Bewegungswahrnehmung war durch die virtuelle Umgebung auf eben diese visuellen Reize (sowie möglicherweise gewisse motorische Informationen durch die Joypad-Steuerung) beschränkt. Daher kann nicht entschieden werden, in welchem Bereich einer derartig variablen Genauigkeitsskala der Versuch stattfand, mit welchen Ergebnissen die gefundenen Fehler also verglichen werden sollten. Möglicherweise fielen die Fehler jedoch auch deshalb so gering aus, weil die Probanden durch das Training über vergleichsweise gute Kenntnisse der Umgebung verfügten. Außerdem war weder ein Sekundenzählen noch eine Korrektur der Initialrichtung verhindert worden, so dass zusätzliche Strategien zur Verfügung standen.

Folgender Versuch Im folgenden Versuch soll das Übersichtswissen der Probanden getestet werden. Zu diesem Zweck wurde den Probanden die Aufgabe gestellt, von unterschiedlichen Orten der Umgebung die Richtungen zu den beiden Zielpunkten anzugeben. Besonders von unbekanntem Positionen aus sollte dies nur mit Hilfe von Übersichtswissen möglich sein.

6 Pointing

6.1 Fragestellung und Durchführung

Wie sicher konnten die Probanden die eigene Position relativ zur Lage der Zielpunkte einschätzen? Welche Orientierungshilfen wurden verwendet, um diese Einschätzung zu bewerkstelligen?

Um dies zu prüfen, wurden die Probanden an verschiedene Stellen der gewohnten Trainingsumgebung gesetzt und sollten so akkurat wie möglich auf die beiden Ziele "Nest" und "Feeder" deuten. Sie erhielten keine Anweisung, sich zu beeilen. Das jeweilige Ziel wurde per Bildschirmtext (beispielsweise "Deute zum Feeder!") angezeigt. Der Proband wählte die Richtung, indem er mittels Joypad die Umgebung rotieren ließ, bis die Blickrichtung korrekt war. Die gewählte Richtung wurde durch Tastendruck am Joypad bestätigt. Dann änderte sich der Bildschirmtext (im Beispiel wäre nun "Deute zum Nest!" an der Reihe). Von jedem Punkt mußte auf beide Ziele gezeitigt werden. Die Reihenfolge, in der die Ziele abgefragt wurden, war randomisiert. Bei jedem Experiment mußten die Richtungen von maximal 20 Punkten aus angegeben werden, wobei jeweils zwischen zwei Punkten zwei Sekunden lang "Warte" in weißer Schrift auf schwarzem Hintergrund eingeblendet wurde.

Um die Punkte, von denen aus gepointet werden sollte, auszuwählen, wurde die Umgebung in Delaunay-Dreiecke zerlegt. Dazu wurden jeweils die drei am nächsten zusammenliegenden Hindernisse (bzw. deren Schwerpunkte) miteinander zu Dreiecken verbunden. Die Schwerpunkte dieser Dreiecke bildeten mögliche Pointingpunkte. Um die Richtungswahl der Probanden nicht durch das Ende der Umgebung zu begrenzen, wurden nur Dreiecke ausgewählt, die innerhalb einer Ellipse zu liegen kamen, welche die äußeren Dreiecke ausschloss (vergleiche Abbildung 42, Seite 63).

Die Auswahl der Dreiecke wurde an jedem Versuchstag für jeden Probanden individuell durchgeführt. Es wurden Punkte gewählt, welche der Proband an diesem Tag unterschiedlich oft (gar nicht, selten, manchmal, häufig) betreten hatte. Die Bekanntheit wurde als Produkt aus der Betretungshäufigkeit und der im betrachteten Dreieck verbrachten Zeit errechnet.³⁶ Die Kategorien sollten sicherstellen, daß bei jedem Pointingexperiment Dreiecke vorkamen, die dem Probanden unterschiedlich geläufig waren. Die Reihenfolge der Positionen war über alle Kategorien randomisiert. Aus jeder Kategorie wurden so viele Dreiecke wie möglich bestimmt, maximal jedoch jeweils fünf, da das Experiment sich als recht anstrengend erwies hatte. Die Dauer des Experimentes war stark vom Probanden abhängig und betrug zwischen 10 und 25 Minuten (Mittelwert 15 Minuten).

Der Pointingversuch wurde ab dem zweiten Trainingstag direkt im Anschluß an das Training durchgeführt. Am ersten und am letzten Trainingstag fand er nicht statt. Am ersten Tag fand er nicht statt, weil sich der PTA-Test mit anschließendem ersten Training als sehr anstrengend erwies hatte, am letzten Tag wurde er durch den Homing-Versuch ersetzt. Je nach dem, wie viele Trainingseinheiten der jeweilige Proband benötigte, um das Lernziel zu erreichen (vgl. Kapitel 2.2, Seite 15), wurde das Pointen also zwei bis drei Mal wiederholt. Die Probanden erhielten keine Information über die Richtigkeit ihrer Richtungsangaben.

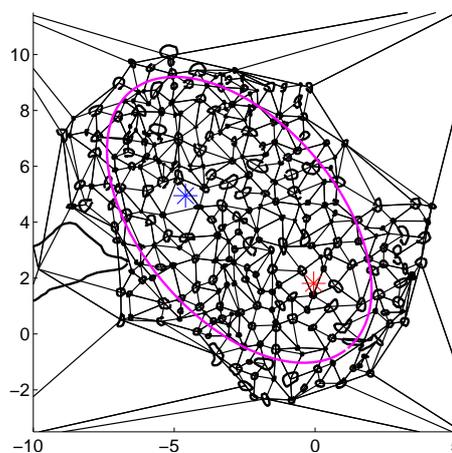


Abbildung 42: Karte der verwendeten Umgebung mit eingezeichneten Delaunay-Dreiecken. Die Ellipse umschließt alle möglichen Punkte, von denen aus die Richtung zu den Zielpunkten angegeben werden sollte. Die Positionen der beiden Ziele sind durch Asterisken markiert (blau: Nest, rot: Feeder).

³⁶Skaliert wurden beide Werte mit dem jeweils an diesem Tag vorkommenden Maximalwert (Betretungshäufigkeit des am häufigsten besuchten Dreieck bzw. Besuchsdauer des Dreiecks, in dem sich der Proband am längsten aufgehalten hatte). Die Kategorien umfaßten Dreiecke mit einer "Bekanntheit" B von $0 < B < 0.005$, $0.005 \leq B < 0.3$ und $0.3 \leq B \leq 1$. Für die Auswertung wurde die Bekanntheit allerdings anders berechnet, siehe Kapitel 6.2.7, Seite 69.

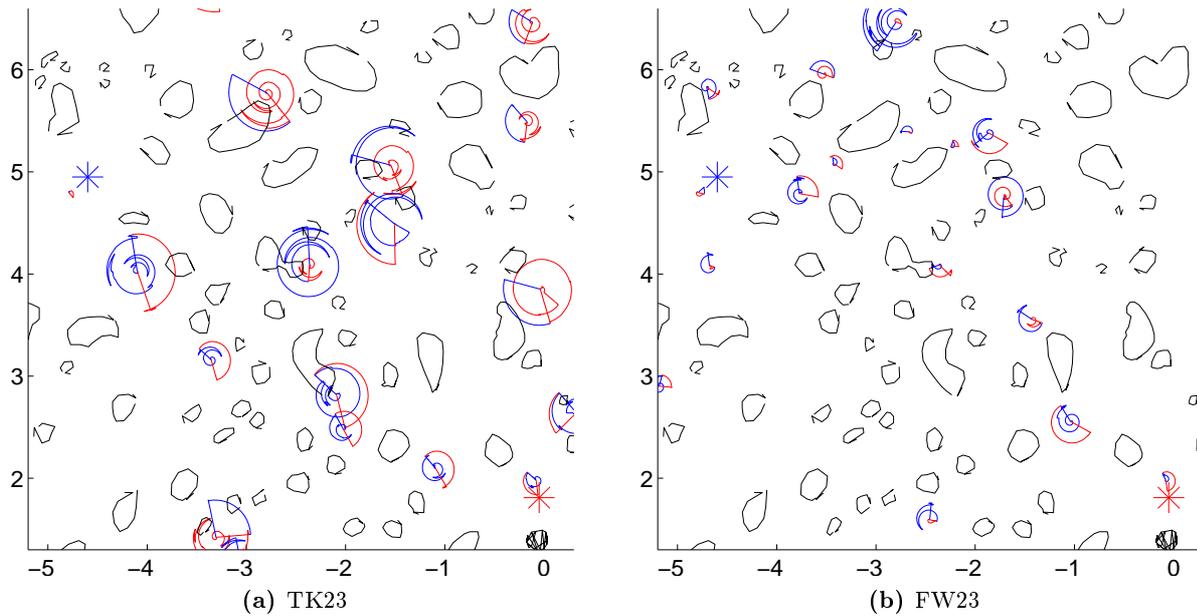


Abbildung 43: Rotationswährend der Pointingaufgabe. **a** Ausschnitt des zweiten Pointingversuches von TK23. **b**: Ausschnitt des zweiten Pointingversuches von FW23. In beiden Abbildungen liegen die Zentren der Spiralen auf den jeweiligen Pointingpunkten, der Radius wächst linear mit der Zeit. In rot sind die Drehungen bis zum Pointen zum Feeder eingezeichnet, in blau die Rotationen bis zum Pointen zum Nest. Die letztlich bestätigten Pointingrichtungen sind durch die geraden Verbindungen zum Spiralmittelpunkt angedeutet. Die Zielpositionen sind als Asterisken (blau - Nest, rot - Feeder) eingezeichnet.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Vorgehensweise der Probanden

Die Probanden drehten sich an jedem neuen Pointingpunkt so lange, bis sie glaubten, die Zielpositionen einordnen zu können. Dann korrigierten sie die Ausrichtung, bis das verlangte Ziel in "Blickrichtung" lag und bestätigten die Pointingrichtung durch Knopfdruck. Das folgende zweite Ziel wurde in der Regel deutlich schneller anvisiert, da die eigene Position zu diesem Zeitpunkt bereits feststand. Abbildung 43 (Seite 64) zeigt mehrere Pointingpunkte eines Probanden mit eingezeichneten Rotationen. Die seit Beginn dieser Messung vergangene Zeit wurde als Maß für den Radius der eingezeichneten Blickrichtungsspiralen verwendet. Die Rotation war relativ langsam eingestellt (ca. 26° pro Sekunde, vgl. Kapitel 2, Seite 14). Daher wurde auf eine Auswertung der Reaktionszeiten der Probanden gänzlich verzichtet, obwohl die entsprechenden Daten mit aufgezeichnet wurden. Bereits in diesem Beispiel wird allerdings deutlich, dass das Ausmaß der Orientierungsdrehungen von Punkt zu Punkt und von Proband zu Proband ganz unterschiedlich ausfiel. Eine Auswertung beispielsweise anhand des Ausmaßes der notwendigen Drehungen wäre also denkbar gewesen. Allerdings war die Aufgabe der Probanden auf ein möglichst genaues Richtungsangeben beschränkt, es war nicht verlangt worden, mit maximaler Geschwindigkeit zu pointen. Daher wird die jeweilige Interpretation der Aufgabe durch die einzelnen Probanden die Pointinggeschwindigkeit stark beeinflusst haben.

Auch in diesem Versuchsteil machten die Probanden Angaben dazu, an was sie sich orientierten. Hier wurden globale Landmarken, wiedererkannte Hindernisse sowie der Abstand zum Rand der mit Hindernissen bestandenen Umgebung genannt. Dieser Abstand zum Rand lässt sich aus dem Abstand zum äußersten noch sichtbaren Hindernis bestimmen.

6.2.2 Wie exakt deuten die Probanden bei sichtbarem Ziel?

Zur Kontrolle der allgemeinen Pointinggenauigkeit wurden Dreiecke gewählt, von denen aus die Probanden eines der beiden Ziele sehen konnten (pro Ziel zwei Dreiecke). Für jedes Pointingereignis wurde die Abweichung von der angezeigten Richtung zum Mittelpunkt des Zieles bestimmt. Diese Abwei-

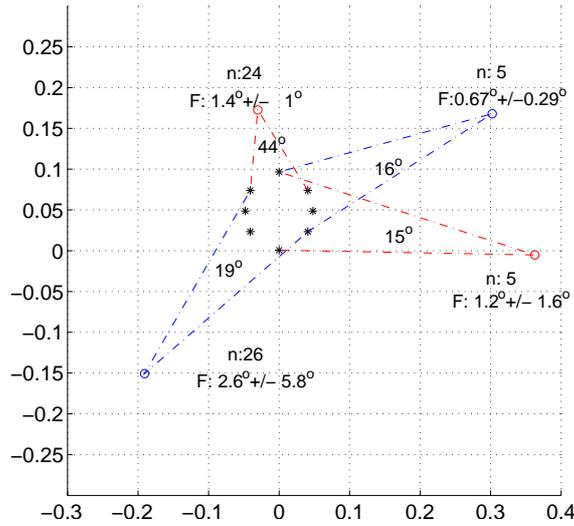


Abbildung 44: Relative Lage der Punkte, von denen aus das Ziel sichtbar war (blau: Nest ist sichtbar, rot: Feeder ist sichtbar). Die angegebenen Fehler F sind die mittleren Abweichungen vom Mittelpunkt des Zieles \pm Standardabweichung, n gibt an, wie oft von dem jeweiligen Punkt aus die Richtung angegeben wurde.

chung wird im Folgenden als Pointing- oder Winkelfehler bezeichnet. Die mittlere Abweichung³⁷ für diese Punkte lag bei $1.5^\circ \pm 0.8^\circ$ (Standardabweichung). Die Ausdehnung des Zieles von dem Punkt aus, von dem gedeutet werden sollte, betrug jedoch zwischen 15° und 44° (vergleiche Abbildung 44, Seite 65). Die Probanden schienen sich also zur Mitte des Zieles hin zu orientieren und die Pointinggenauigkeit war sehr hoch.

6.2.3 Wie sind Pointingfehler verteilt?

Gleichverteilung Sollten die Probanden überhaupt keine bevorzugte Richtung haben, so wäre zu erwarten, daß die Pointingrichtungen einer Gleichverteilung folgen. Diese Verteilung kann somit als "Zufallsniveau" herangezogen werden. In Abbildung 45 (Seite 66) sind die mittleren resultierenden Längen \bar{R} der Summenvektoren (\pm Standardabweichung) gegen die Anzahl x der Pointingereignisse pro Pointingpunkt aufgezeichnet. Gemittelt wurde hierbei über alle \bar{R} aus Pointingpunkten gleicher Pointinganzahl. N ist über dem Plot angegeben und nennt die Anzahl der Punkte, von denen x mal gedeutet wurde. Als Vergleich wurde der selbe Wert für gleichverteiltes Pointen ermittelt (untere Kurve ohne Asterisken). Hierzu wurden 500 mal x Zufallswerte aus einer Gleichverteilung "gezogen" und analog zu den experimentellen Daten jeweils die resultierenden Längen \bar{R} bestimmt und über alle 500 Ereignisse gemittelt. Auch hier wird die zugehörige Standardabweichung angegeben. Die resultierende Länge \bar{R} errechnet sich (vergleiche Fisher 1993) als

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{C}^2 + \bar{S}^2} \quad (10)$$

Dabei gilt

$$\bar{C} = \frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \cos(\theta_j) \quad (11)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \sin(\theta_j) \quad (12)$$

θ_j mit $j \in [1, x]$ sind die Richtungen, in die gedeutet wurde. \bar{R} liegt zwischen 0 und 1 und ist umso kleiner, je stärker die betrachteten Werte streuen. Bei einmaligem Pointen ist

$$\bar{R} = \sqrt{\sin^2\theta + \cos^2\theta} = 1 \quad (13)$$

Wird wie bei einer Gleichverteilung ohne jede Richtungspräferenz gedeutet, so geht \bar{R} für steigende Pointinganzahl x gegen 0. Die experimentellen Datenpunkte liegen dagegen deutlich über diesem

³⁷Zur Ermittlung dieses Wertes wurde einer der 61 Messwerte ignoriert (79°), da der Proband angab, er habe das Ziel nicht gesehen, da er sich vor der Eingabe nicht vollständig gedreht habe.

Zufallsniveau, was darauf schließen lässt, dass die Pointingrichtungen keiner Gleichverteilung folgen, sondern eine Richtungspräferenz existiert.

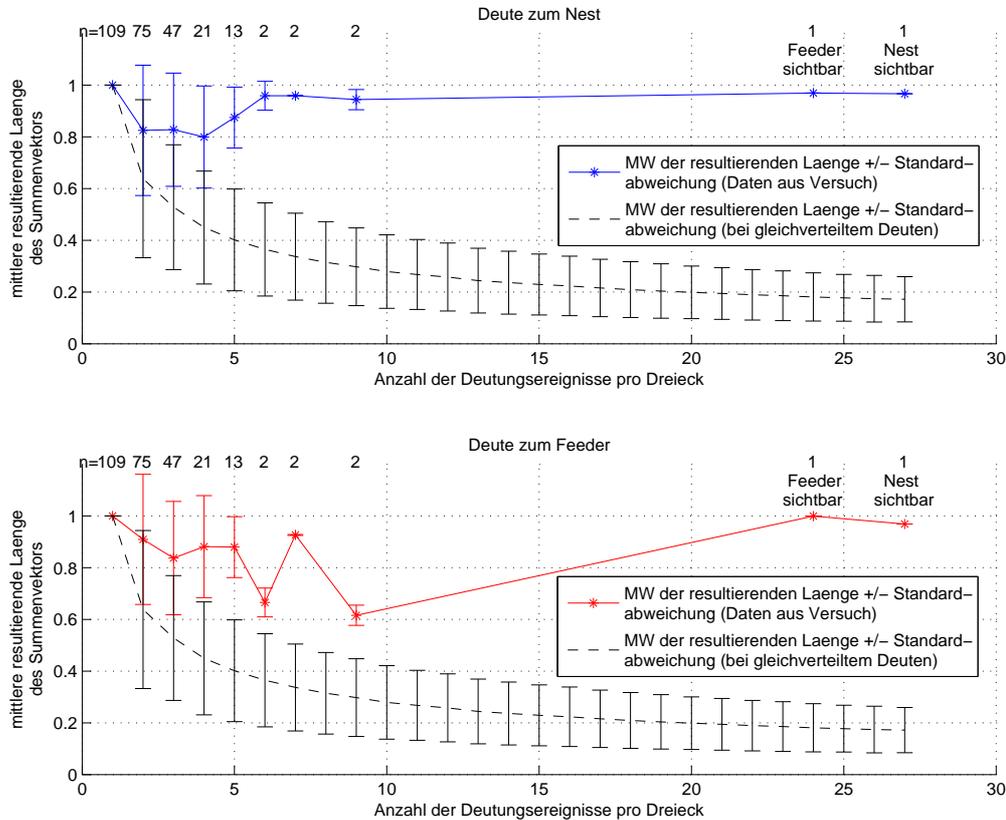


Abbildung 45: Entwicklung der mittleren resultierenden Länge \bar{R} des Summenvektors mit wachsender Anzahl der Pointingereignisse pro Punkt \pm Standardabweichung (jeweils obere Kurve, -*-). In beiden Diagrammen geben die unteren Kurven $\bar{R} \pm$ Standardabweichung bei gleichverteiltem Punkten an. **Oben:** "Deute zum Nest", **unten:** "Deute zum Feeder".

Normalverteilung Die Pointingfehler sind nicht normalverteilt, dazu gibt es zu viele Fehler nahe des Mittelwertes.

Die Pointingfehler beider Aufgaben ("Zeige zum Nest" und "Zeige zum Feeder") wurden sowohl getrennt, als auch zusammengefasst auf Normalverteilung getestet. Die ermittelten Pointingfehler sind in Abbildung 46, Seite 67, in Histogrammform dargestellt. Zusätzlich ist hier eine Normalverteilung mit den anhand der Daten geschätzten Parametern $\hat{\mu}$ und $\hat{\sigma}$ eingezeichnet.

Für den Test auf Normalverteilung wurden die Daten durch eine z-Transformation standardisiert:

$$z_i = \frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \tag{14}$$

Anschließend wurde ein Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt. Dieser Test wurde zum Vergleich der gegebenen Verteilung mit der Standardnormalverteilung genutzt. Die Nullhypothese einer Standardnormalverteilung konnte sowohl für getrennt betrachtete Zielpunkte, als auch für die zusammengefassten Daten klar abgewiesen werden (p immer $< 10^{-4}$).

Eine weitere Möglichkeit, die Verteilung der Daten visuell mit einer Standardnormalverteilung zu ver-

gleichen, bieten Quantil-Quantil-Plots (Stahel 1996, Seite 236). Hierbei werden die n Messwerte nach ihrer Größe sortiert und jedem Messwert eine Prozentzahl p_k zugeordnet:

$$p_k = \frac{(k - \frac{1}{2})}{n} \quad (15)$$

für $k=1..n$.

Diese Werte werden den ihnen entsprechenden Dichtewertungen einer Standardnormalverteilung $N(0,1)$ zugeordnet. Liegt eine Normalverteilung $N(\mu, \sigma)$ vor, so ergibt sich eine Gerade (μ und σ^2 lassen sich dabei aus der Steigung und dem y-Achsen-Abschnitt schätzen). Nicht normalverteilte Zufallsvariablen werden nicht in einer Geraden dargestellt. Die resultierenden Kurven sind in Abbildung 46d auf Seite 67 dargestellt und können nur schlecht durch eine Gerade angenähert werden. Da keine Normalverteilung vorliegt, werden im folgenden nicht-parametrische Tests verwendet.

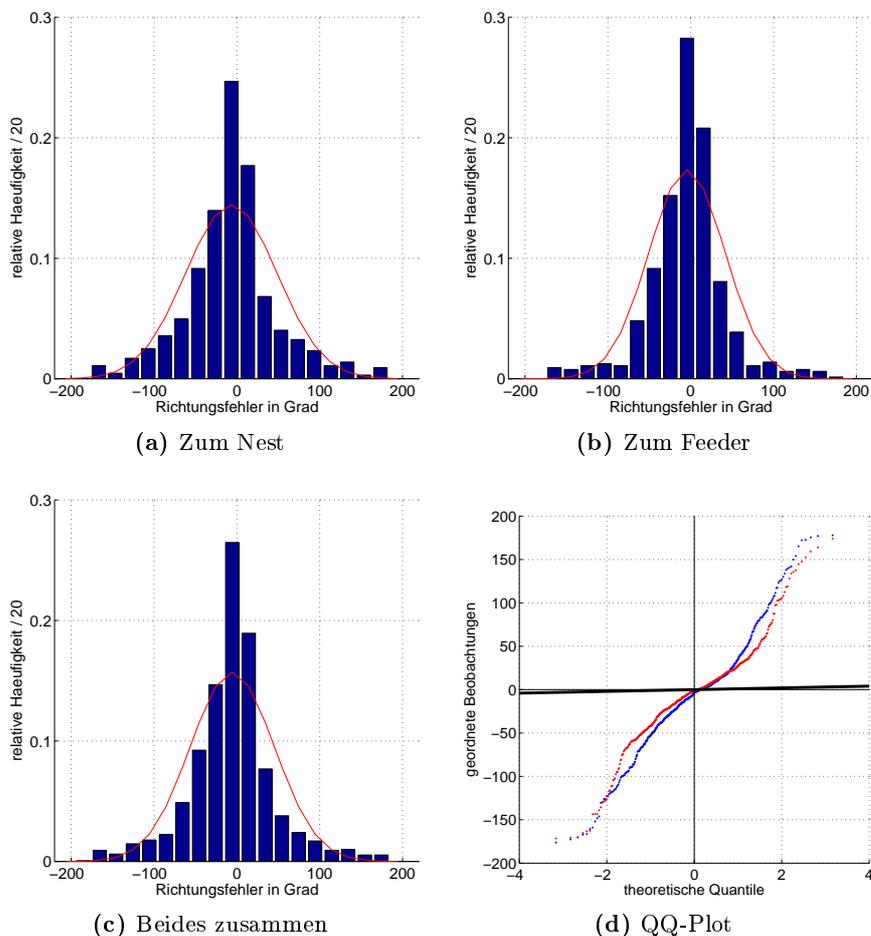


Abbildung 46: Vergleich der Verteilung der Pointingfehler mit der Normalverteilung. **a-c:** Relative Häufigkeit der Winkelfehler (skaliert mit der Klassenbreite), in rot ist jeweils die Dichte einer Normalverteilung $N(\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2)$ mit aus den Daten geschätzten $\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2$ eingezeichnet. **a:** Fehlerverteilung beim Deuten zum Nest, **b:** Fehlerverteilung beim Deuten zum Feeder, **c:** Beide Aufgaben zusammen betrachtet. **d** Quantil-Quantil-Plot: Verteilung der Pointingfehler gegen Standardnormalverteilung. **Blau:** Richtungsfehler beim Deuten zum Nest. **Rot:** Richtungsfehler beim Deuten zum Feeder. **Schwarz:** Richtungsfehler beider Aufgaben zusammen betrachtet. Alle $N(\mu, \sigma^2)$ verteilten Daten werden auf einer Geraden dargestellt, standardnormalverteilte Daten ($\mu = 0, \sigma^2 = 1$) liegen auf der ersten Winkelhalbierenden, die in dieser Darstellung durch die unterschiedliche Achsenskalierung sehr nah an der x-Achse erscheint (**schwarze Gerade**).

Eine Normalverteilung der Pointingfehler kann nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test für jede Variante (zum Nest, zum Feeder, beides zusammen) abgelehnt werden ($p < 10^{-4}$).

6.2.4 Werden die Probanden mit zunehmendem Training besser?

Der Versuch wurde, abhängig davon, wieviele Trainingssitzungen ein Proband benötigte, zwei oder drei Mal durchgeführt. Die Entwicklung der mittleren Winkelfehler der einzelnen Probanden³⁸ ist in Abbildung 47, Seite 68 dargestellt. Vergleicht man die Pointingereignisse aller Probanden bei der ersten und letzten Durchführung des Versuches, so ergibt sich keine signifikante Veränderung (Vorzeichen-Rangtest nach Wilcoxon, $p > 0.05$, ohne IW25).

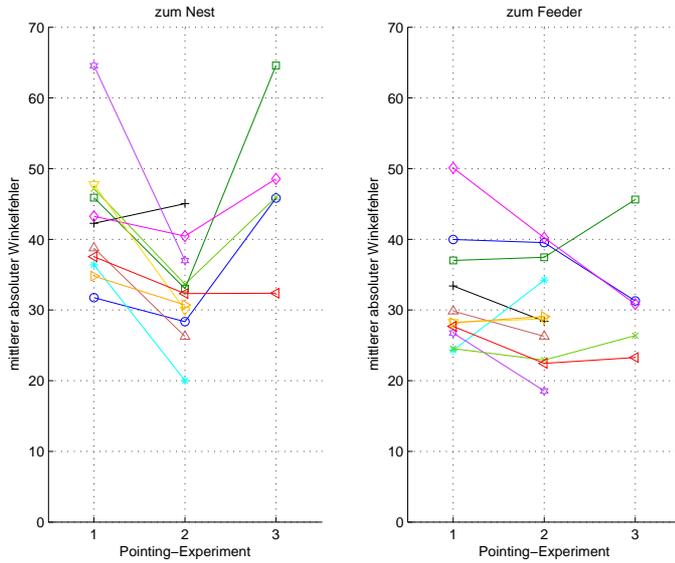


Abbildung 47: Mittlerer Winkelfehler der einzelnen Probanden gegen die Nummer des Pointingversuches. **Links** sind die Fehler beim Deuten zum Nest, **rechts** die beim Deuten zum Feeder aufgetragen.

³⁸Farb- und Markercodierungen entsprechen wie in den bisherigen Kapiteln den in Anhang A angegebenen.

6.2.5 Ändert sich der Fehler mit zunehmendem Abstand vom Ziel?

Der Winkelfehler wurde als Abweichung der Pointingrichtung von der direkten Richtung zum Zielpunkt gewertet (vgl. Abbildung 48, "Winkel"). Er zeigt eine klare Abhängigkeit von der Distanz zum Zielpunkt (vgl. Abbildung 49a, Seite 70): Der Fehler ist sehr klein, wenn die Distanz sehr gering ist. Etwas weiter entfernt steigt der Fehler schlagartig an, um dann mit zunehmendem Abstand wieder abzunehmen.

Der sehr geringe Anfangswert ist dadurch bedingt, dass bei extrem kleinem Abstand das Ziel sichtbar ist und direkt anvisiert werden kann. Im ersten Punkt des Schaubildes wurden bereits mehrere Pointingpunkte gemittelt, weshalb der Fehler größer ist als der in Kapitel 6.2.2 auf Seite 64 angegebene Wert.

Eine zweite Möglichkeit, die Pointinggenauigkeit zu betrachten, ist durch den minimalen Abstand der Pointinghalbgeraden vom Zielpunkt gegeben (vgl. Abbildung 48, "Distanz"). Dieser Distanzfehler ist in Abb.49b (Seite 70) für verschiedene Distanzen gemittelt aufgetragen. Hier ergibt sich ein umgekehrtes Bild, der Fehler wächst mit zunehmendem Abstand.

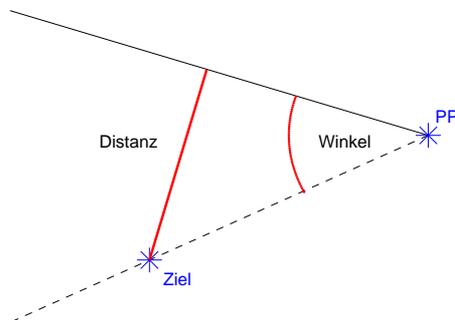


Abbildung 48: Erklärung von Winkel- und Distanzfehler. **PP** steht für Pointingposition, von hier aus soll zum **Ziel** gepointet werden. Die Idealrichtung ist als gestrichelte, die tatsächliche Pointingrichtung als durchgezogene schwarze Linie dargestellt. Die beiden Fehler sind durch den Winkel zwischen den beiden Richtungen und den minimalen Abstand des Zielpunktes von der Pointinghalbgeraden gegeben (rot).

6.2.6 Spielt der Ort eine Rolle?

Gibt es besonders schwierige oder besonders einfache Regionen? Um diese Frage visuell grob zu beurteilen, wurden die Winkelfehler nach Bereichen gemittelt (vgl. Abbildung 50, Seite 70). Dazu wurden konzentrische Kreise um die Zielpositionen gelegt ($\delta_{\text{Radius}} = 0.5 \text{ EE}$) und die resultierenden Bänder in jeweils 12° umfassende Abschnitte eingeteilt (gepunktete, magenta gefärbte, konzentrische Kreise und "Speichen" in Abbildung 50). Dann wurden die Pointingfehler abschnittsweise gemittelt. Die resultierenden mittleren Winkelfehler sind, ausgehend von dem inneren begrenzenden Kreis in der Mitte des betrachteten Winkelbereiches, als Strich eingetragen. Die relative Länge des Striches gibt die Fehlergröße, dabei entspricht ein Strich, der zwei aufeinanderfolgende Kreise verbindet, 180° . Der Einfluss des Abstandes zum Zielpunkt (vgl. Kapitel 6.2.5, Seite 69) auf den Winkelfehler ist auch hier klar zu erkennen. Davon abgesehen wird höchstens eine schwache Regionalisierung sichtbar: Die Winkelfehler beim Pointen zum Nest auf der feederabgelegenen Seite des Nestes fielen deutlich größer aus als auf der dem Feeder zugewandten Seite. Beim Pointen zum Feeder ergibt sich jedoch kein entsprechendes Bild. Um eine derartige Auswertung zufriedenstellend durchzuführen müssten jedoch die Pointingpunkte flächendeckender verteilt und der Stichprobenumfang entsprechend vergrößert werden.

6.2.7 Spielt der Bekanntheitsgrad der Punkte, von denen aus gedeutet werden soll, eine Rolle?

Es wurde untersucht, ob die Genauigkeit des Pointens davon beeinflusst wird, wie bekannt ein Dreieck dem Probanden war. Die Bekanntheit kann von verschiedenen Parametern, beispielsweise von der Anzahl der Besuche, die der Proband dem Dreieck abgestattet hat, oder seiner Aufenthaltsdauer dort, abhängen. Beide Parameter können sich entweder nur auf das Training am Versuchstag beziehen, oder auf alle vorangehenden Trainingseinheiten. Im Folgenden wird als "Bekanntheit" die Besuchszahl an allen vorangehenden Tagen (einschließlich dem Tag des Experimentes) bezeichnet.

In Abbildung 51, Seite 71 sind die Pointingfehler gegen die Bekanntheit des Pointingpunktes aufgetragen. Die Bekanntheit der Dreiecke, von denen aus die Richtungen zu den Zielen angegeben werden

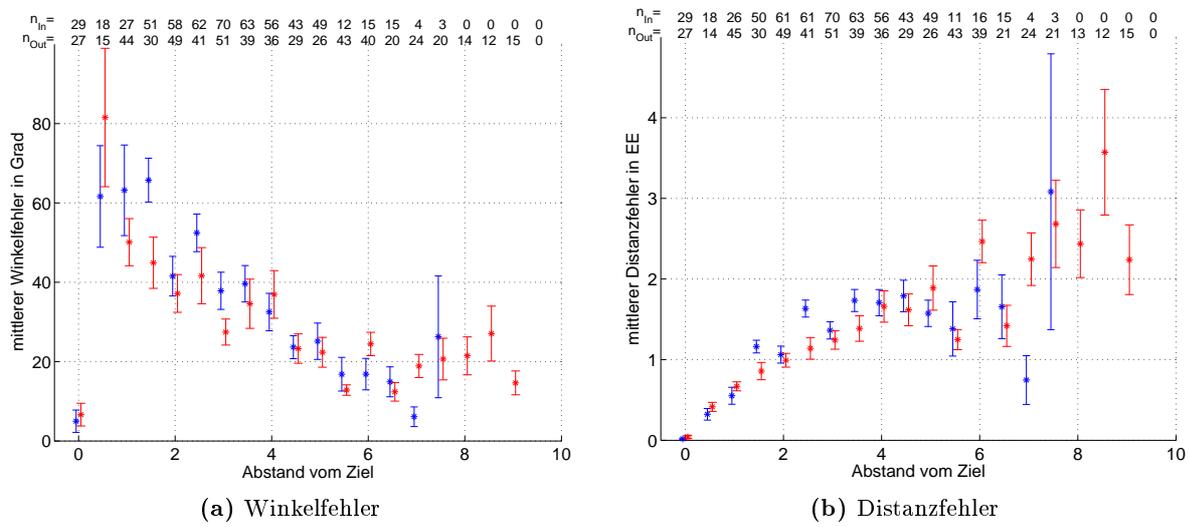


Abbildung 49: Pointingfehler gegen Abstand vom Zielpunkt. **a:** Winkelfehler. **b:** Distanzfehler. In beiden Angaben geben die Fehlerbalken die Standardfehler. Fehler beim Deuten zum Nest sind blau, zum Feeder rot dargestellt. Die über den Abbildungen angegebenen n geben die Anzahl der verwendeten Pointingereignisse an. Die obere Zeile (n_{in}) zum Nest, die untere (n_{out}) zum Feeder. Unterschiede zwischen der Anzahl der für den Winkelfehler und für den Distanzfehler verwendeten Daten sind dadurch bedingt, dass der Distanzfehler nur für Winkelfehler $< \pm 90^\circ$ sinnvoll bestimmt werden kann. Für größere Winkelfehler ist der Distanzfehler gleich dem Abstand zum Ziel.

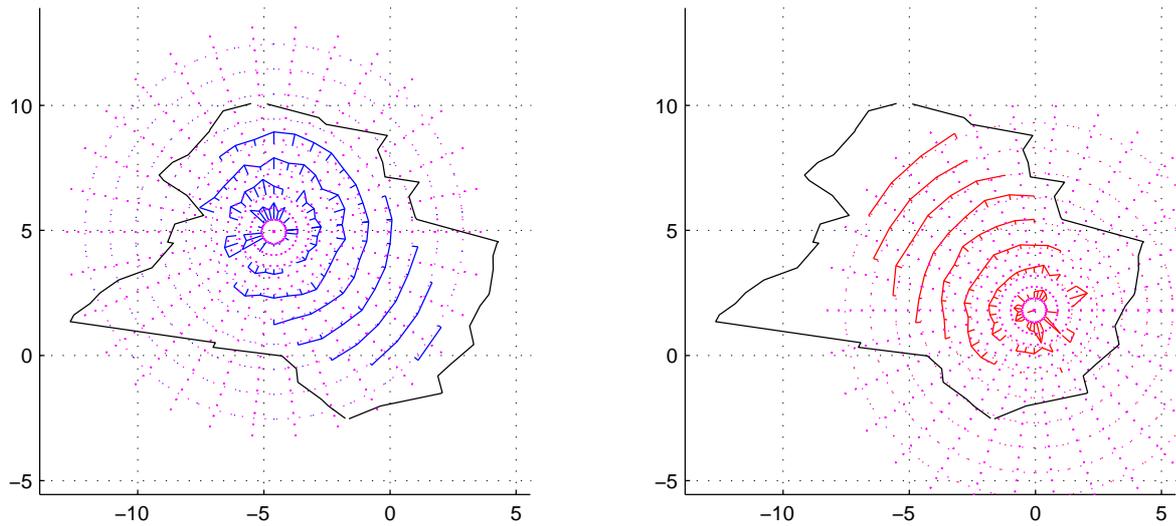


Abbildung 50: Winkelfehler, gemittelt nach Distanz vom Ziel und Winkelbereich. **Links** der Fehler beim Deuten zum Nest, **rechts** der Fehler beim Deuten zum Feeder. Die magenta Kreise sowie die Balken zeigen die Einteilung der Umgebung; die mittleren Fehler sind als Balkenhöhe in die gemittelten Bereiche eingetragen. Der schwarze Umriss gibt zur Orientierung grob die äußeren Grenzen der Hindernisse wieder.

sollten, lag zwischen 0 (während des Trainings überhaupt nicht betreten) und 30. Die Bekanntheit wurde in Kategorien unterteilt, wobei die Kategoriengrenzen so gewählt wurden, dass jeder Proband mindestens ein Mal von einem Dreieck jeder Kategorie die Richtungen zu Nest und Feeder angegeben hatte. Die Kategoriengrenzen sind in Abbildung 51 (Seite 71) auf der x-Achse angegeben. Die zugeordneten Werte sind die über alle Pointingereignisse aus Dreiecken dieser Kategorie gemittelten Pointingfehler. In den ersten drei Abbildungen sind die Fehler dabei für die einzelnen Probanden aufgeschlüsselt, im 4. Schaubild wurden alle Probanden (und alle Pointingdurchgänge) gemeinsam gemittelt. Zusätzlich ist hier die Standardabweichung eingetragen. Der erkennbare Trend erweist sich als hochsignifikant (Pages L-Test): Die Nullhypothese einer gleichbleibenden Verteilung kann unter $\alpha=0.001$ abgelehnt werden.

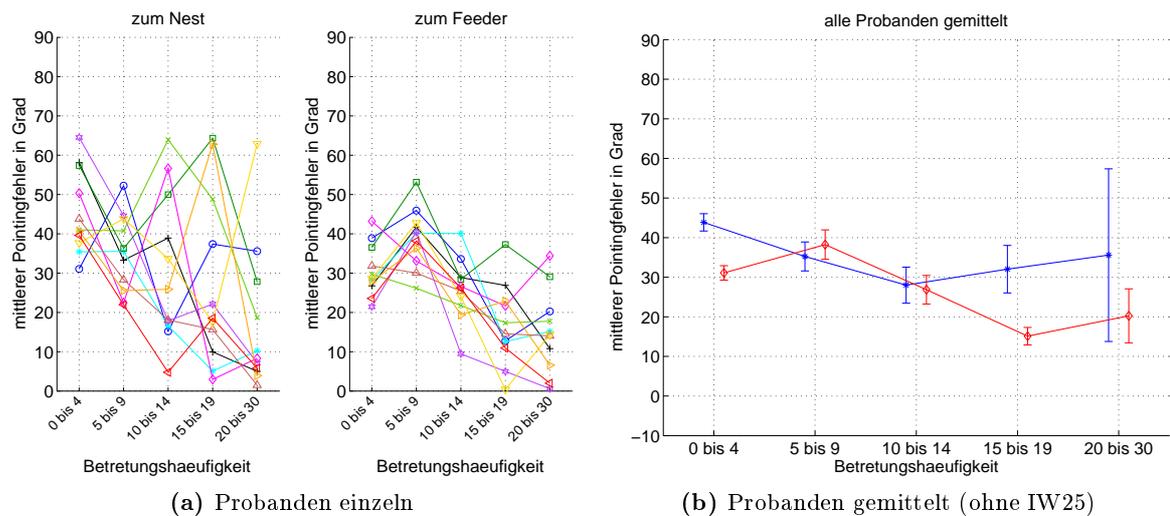


Abbildung 51: Mittlere Pointingfehler gegen Bekanntheit der Dreiecke. **a:** mittlere Fehler der einzelnen Probanden beim Deuten zum Nest (links) und zum Feeder (rechts). **b:** Mittlerer Fehler aller Probanden \pm Standardfehler. Die Anzahl der beteiligten Probanden n ist in jeder Bedingung 10 (IW25 weggelassen). Blau mit Asterisk: Fehler beim Deuten zum Nest. Rot mit Raute: Fehler beim Deuten zum Feeder.

6.2.8 Haben die globalen Landmarken einen Einfluss auf die Genauigkeit des Pointens?

Alle Probanden äußerten sich verwirrt, wenn sie von Plätzen aus pointen sollten, an denen alle globalen Landmarken durch Hindernisse verdeckt waren. Auch sprachen sie häufig, während sie sich durch Rotation zu orientieren versuchten, die Farben der gerade sichtbaren globalen Landmarken laut aus und versuchten, die Position verdeckter Landmarken durch Abschätzen des Winkels oder der Drehzeit zur nächsten sichtbaren globalen Landmarke zu bestimmen. Daher wurde getestet, ob die Anzahl sichtbarer globaler Landmarken einen Einfluss auf die Größe des Winkelfehlers habe. Das Ergebnis ist in Abbildung 52b auf Seite 72 dargestellt: je mehr globale Landmarken sichtbar waren, desto kleiner ist der Winkelfehler. Um zu testen, ob dieser Trend signifikant war, wurde auf Grundlage der mittleren Fehler der einzelnen Probanden (siehe Abbildung 52a, Seite 72) ein Rangsummen-Test nach Ellis Page durchgeführt (Page 1963). Da nicht bei allen Probanden Dreiecke vorkamen, von denen aus keine einzige globale Landmarke sichtbar war, wurde der Test zweimal durchgeführt. Einmal für alle Probanden und ein bis vier sichtbare globale Landmarken und einmal nur für die Probanden, die gelegentlich ohne Hilfe der globalen Landmarken die Richtung hatten angeben müssen und null bis vier sichtbare globale Landmarken. Das Ergebnis ist in allen vier Fällen (zum Nest, zum Feeder, jeweils 0 bis 4 und 1 bis 4 globale Landmarken) signifikant ($\alpha < 0.05$).

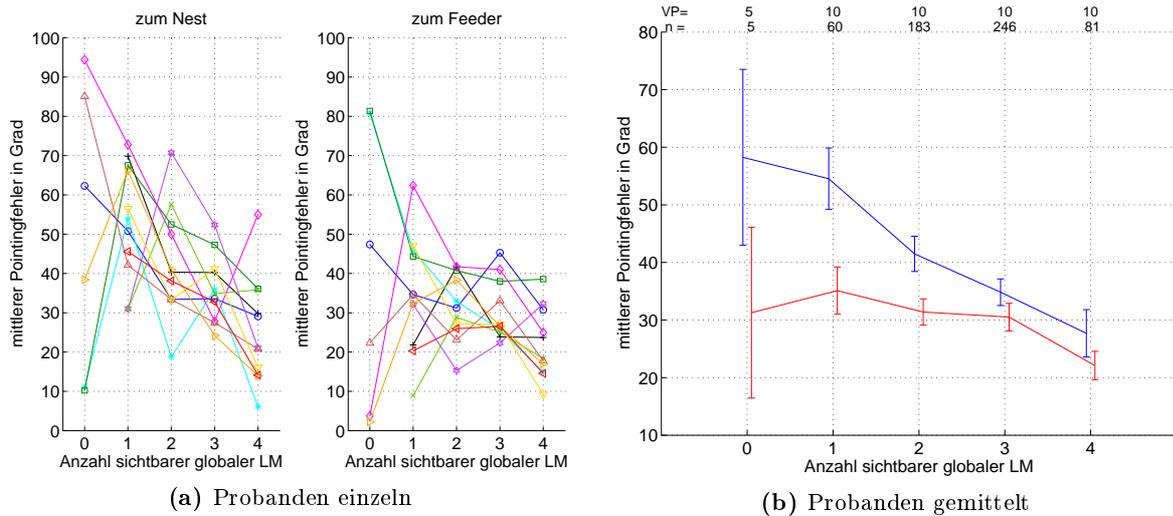


Abbildung 52: Abhängigkeit des Winkelfehlers von der Anzahl sichtbarer globaler Landmarken (LM). **a:** Für die einzelnen Probanden gemittelte Winkelfehler. **b:** Über alle Probanden gemittelter Winkelfehler \pm Standardfehler gegen Anzahl sichtbarer globaler Landmarken. VP gibt die Anzahl beteiligter Probanden, n die Anzahl der Pointingereignisse.

6.2.9 Beeinflussen die Parameter sich gegenseitig?

Die Genauigkeit der Richtungsangabe scheint von mindestens drei Parametern abzuhängen:

1. Abstand vom Ziel: je größer der Abstand, desto kleiner der Winkel- und desto größer der Distanzfehler.
2. Anzahl sichtbarer globaler Landmarken: je mehr sichtbar sind, desto kleiner der Fehler.
3. Bekanntheit der Punkte, von denen aus gedeutet werden soll: Je bekannter der Punkt, desto kleiner der Fehler.

Die Bekanntheit der Pointingpunkte scheint also einen Einfluss auf die Kenntnis der Zielpositionen zu haben (vgl. Abbildung 51, Seite 71). Es ist jedoch auch denkbar, dass die Lage der Pointingpunkte, nicht die Anzahl der vorangehenden Besuche dort, ausschlaggebend ist. Es ist anzunehmen, dass die Lage verschiedener Positionen unterschiedlich schwer einzuordnen war. Möglicherweise lagen gerade die "einfachen" Punkte eher im Zentrum der Umgebung und damit in den Bereichen, in denen die Probanden sich aufgrund der Routenverläufe hauptsächlich aufhielten. Um eine solche Möglichkeit auszuschließen, wurden die Einordnungen aller Dreiecke betreffs der drei betrachteten Parameter (Wie weit ist das Dreieck von den Zielen entfernt? Wieviele globale Landmarken sind vom Dreiecksschwerpunkt aus sichtbar? Welche Bekanntheit hat das Dreieck?) verglichen. Es konnten keine Korrelationen gefunden werden (vgl. Tabelle 6, Seite 72, sowie Abbildung 63 in Anhang D.1). Demnach existierten zumindest keine linearen Abhängigkeiten zwischen den ausgewerteten Parametern.

Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten der dreiecksbeschreibenden Parameter

	Landmarkenzahl	Bekanntheit	Distanz zum Nest	Distanz zum Feeder
Landmarkenzahl	1	0.1507	0.1453	-0.1215
Bekanntheit		1	0.0250	-0.1374
Distanz zum Nest			1	-0.5596
Distanz zum Feeder				1

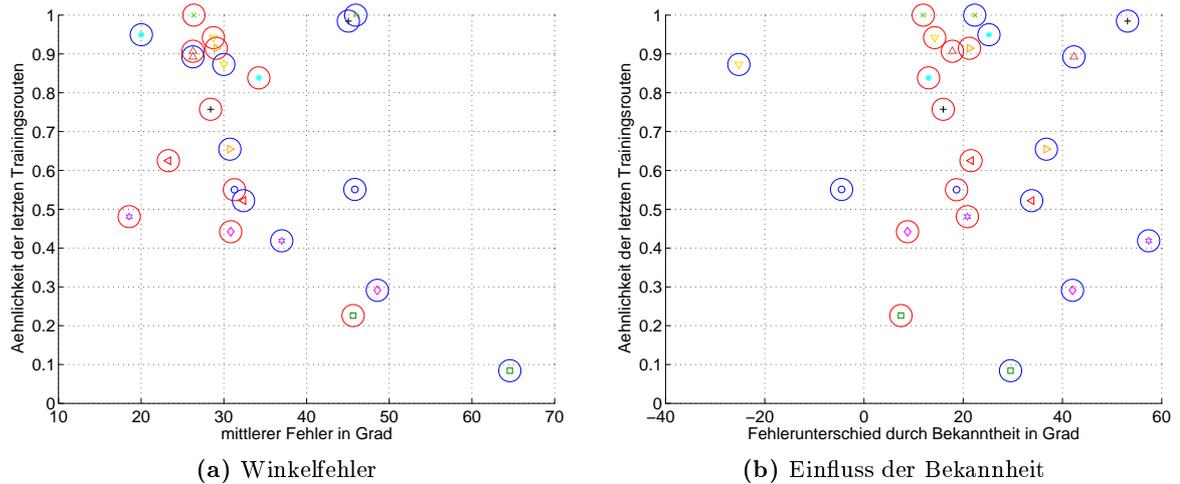


Abbildung 53: Zusammenhang zwischen dem Winkelfehler und der Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien. **a:** Winkelfehler im letzten Pointingversuch gegen die Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien. **b:** Einfluss der Bekanntheit auf die Pointinggenauigkeit: Winkelfehler beim Pointing von unbekanntem Positionen minus Winkelfehler von sehr bekannten Punkten (20-30 Mal betreten) gegen die Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien.

In beiden Abbildungen sind Werte, die das Nest betreffen, durch einen blauen Kreis markiert, jene die den Feeder betreffen, durch einen roten. Die inneren Symbole entsprechen der Probandencodierung.

6.2.10 Hat die Routenähnlichkeit einen Einfluss auf die Pointing-Genauigkeit?

Die Probanden unterschieden sich im Training darin, wie konstant die Routen waren, denen sie folgten. Zeichneten sich die Probanden mit besonders konstanten Routen durch ein besonders akkurates Umgebungswissen aus? In diesem Fall wäre zu erwarten, dass sie auch eine besonders hohe Genauigkeit im Pointen erreichen. Es ließ sich jedoch kein derartiger Trend feststellen. In Abbildung 53a (Seite 73) ist die Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien gegen den mittleren Winkelfehler während des letzten Pointingversuches aufgetragen. Der Korrelationskoeffizient beträgt für Winkelfehler und Ähnlichkeit beider Richtungen gemeinsam, wenn IW25 mit einbezogen wird, -0.51 , also je größer die Routenähnlichkeit, desto kleiner der Winkelfehler. Wird IW25 dagegen weggelassen (wie in den restlichen Auswertungen auch), so sinkt der Korrelationskoeffizient auf -0.19 . Es besteht also kein linearer Zusammenhang zwischen der Routenähnlichkeit und der Pointinggenauigkeit. Zwischen der Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien und dem Einfluss der Bekanntheit auf die Pointinggenauigkeit (als Winkelfehler) bestand ebenfalls kein Zusammenhang (vgl. Abbildung 53b). Der Korrelationskoeffizient betrug hier -0.21 beim Pointen zum Nest und -0.09 beim Pointen zum Feeder. (IW25 wurde wiederum ausgeschlossen.)

6.2.11 Abschätzung des Winkelfehlers durch PTA-Test und Selbsteinschätzung des Orientierungssinnes

Der mittlere Pointingfehler der Probanden korreliert nicht mit ihrer Punktzahl beim PTA-Test (KK -0.19). Der Vergleich ist in Abbildung 54a (Seite 74) dargestellt.

Auch der selbstgeschätzte Orientierungssinn konnte nicht für eine Vorabschätzung der Pointingleistung herangezogen werden (vgl. Abbildung 54b, Seite 74).

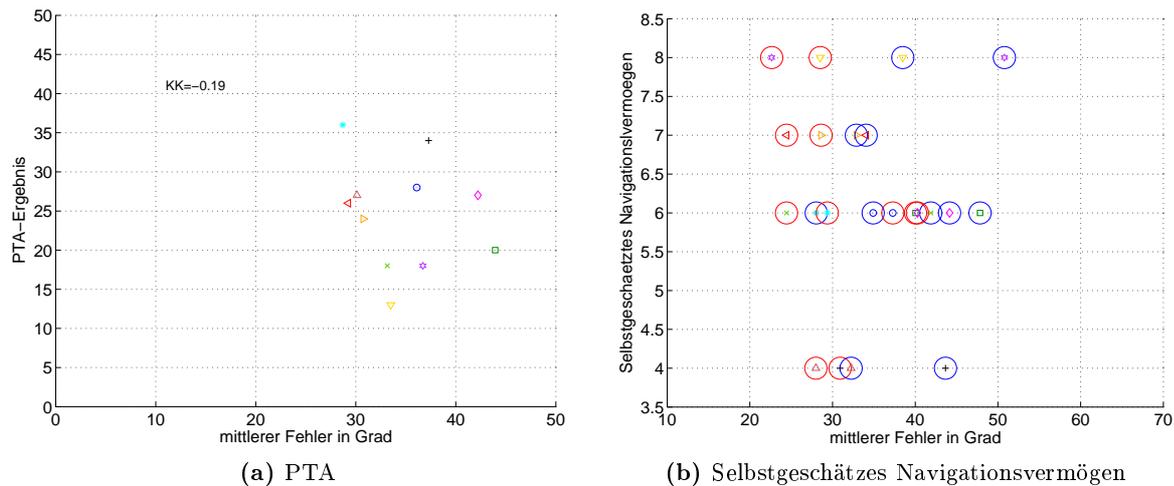


Abbildung 54: Lässt sich der mittlere Winkelfehler bereits vor dem Versuch abschätzen? **a:** Ergebnis des PTA-Testes gegen gemittelten Winkelfehler im Pointingversuch. Es besteht kein linearer Zusammenhang. KK steht für Korrelationskoeffizient. **b:** Selbstgeschätztes Navigationsvermögen gegen gemittelten Winkelfehler im Pointingversuch. Es besteht kein linearer Zusammenhang.

6.3 Diskussion

Welche Merkmale der Umgebung wurden zur Orientierung genutzt? Orte und ihre Wiedererkennung spielen eine entscheidende Rolle für die Navigation. Cornell u. a. (2003) beispielsweise führten ein Experiment durch, in welchem Studenten in einem fensterlosen Raum sich vorstellen sollten, sie befänden sich an bestimmten Plätzen auf dem Campus. Mit Hilfe eines frei rotierbaren Rohres sollten nun die Richtung zu verschiedenen Gebäuden angezeigt werden. Winkelfehler und benötigte Zeit wurden festgehalten. Cornell u. a. (2003) beschreiben, dass die Probanden den Platz, den sie an dem Pointingpunkt sehen würden, aus der Erinnerung reproduzierten, während sie versuchten, die korrekte Pointingrichtung zu ermitteln. Pointing war von einem (nur vorgestellten) offenen Platz aus genauer als aus einem (ebenso vorgestellten) geschlossenen Tunnel. Die Rundumsicht direkt am fraglichen Ort war demnach also auch in diesem Experiment entscheidend. Die Hälfte der Probanden wurde gebeten, laut auszusprechen, an was sie sich während der Richtungseinordnung orientierten. Es wurden sowohl allozentrische (Himmelsrichtungen ebenso wie lokale Landmarken in Form anderer Gebäude) als auch egozentrische Angaben gemacht, es wurde auf Übersichtswissen (Himmelsrichtungen) wie Routenwissen (die Probanden beschrieben den Weg vom Pointingpunkt zum Ziel und versuchten, daraus die Richtung zu bestimmen) zurückgegriffen. Beinahe jeder Proband nutzte dabei mehrere Methoden.

In dem hier durchgeführten Versuch wurden die Probanden direkt an die jeweiligen Positionen gesetzt, es fand also ebenfalls keine Navigation statt. Für eine korrekte Richtungsangabe müssen zwei Positionen in Bezug zueinander gesetzt werden. Zum einen musste die eigene Position bestimmt werden, zum anderen musste auf Informationen, wo in der Umgebung die Ziele zu finden sind, zurückgegriffen werden. Da die eigene Position nicht durch Navigation erreicht wurde, konnte in diesem Fall wie auch bei Cornell u. a. (2003) nicht auf eine unmittelbar zuvor erfolgte Wegintegration zurückgegriffen werden. Stattdessen mußten die Probanden auf zuvor etabliertes Übersichtswissen, oder, im Falle von Positionen nahe oder entlang ihrer Trainingsrouten, auf Routenwissen zurückgreifen. Dieses Übersichtswissen musste ein globales Referenzsystem für die Ausrichtung enthalten. Dies konnte etwa mit Hilfe der vier farbigen Säulen, aber auch über die Horizonttextur oder die Wolken erfolgen. Des Weiteren mussten beide Zielpositionen repräsentiert sein.

Woran orientierten sich die Probanden in diesem Versuchsteil?

Eigenen Angaben zufolge nutzten alle Probanden die farbigen Säulen. Diese Säulen lagen ausreichend nahe an den Hindernissen, so dass sie von verschiedenen Stellen der Hindernis-Umgebung aus betrachtet deutlich unterschiedlich groß erschienen. Aufgrund von Richtung und Größe der einzelnen Säulen ließ sich bereits eine Einschätzung der eigenen Position vornehmen, umso besser, je mehr Säulen sichtbar waren. Allerdings sollte diese Einschätzung mit einer relativ großen Unsicherheit (engl. *confusion area*) verbunden sein. Das nächste Merkmal, das von allen Probanden zur Orientierung genannt wur-

de, war die Entfernung zum Rand der hindernisbestandenen Region. Durch diese Entfernung ließ sich vermutlich die Unsicherheit weiter einschränken. Da bereits von dem Informationsblatt des Trainings bekannt war, in welchen Bereichen der Umgebung die Zielpunkte zu finden seien (das Nest näher an der blauen und der gelben Säule, der Feeder in der anderen Hälfte der Umgebung, also näher an rot und grün), sollte diese Einschätzung bereits vor der Training, also ohne nähere lokale Erfahrung, möglich sein.

In dem selben Kontext muss auch das Ergebnis gesehen werden, dass der Winkelfehler mit zunehmendem Abstand vom Zielpunkt immer kleiner wurde. Die Einordnung der eigenen Position relativ zur Lage des Zieles wird schon durch einen rein geometrischen Effekt umso einfacher werden, je weiter man vom Ziel entfernt ist, bzw. je näher man dem gegenüber liegenden Rand und den dort liegenden globalen Landmarken kommt. Der mögliche Kreisausschnitt, in welchem das Ziel liegen könnte, verkleinert sich mit zunehmendem Abstand, da erstens die mit Hindernissen besetzte Umgebung (in der beide Zielpunkte liegen) begrenzt ist und zweitens bekannt ist, in welcher, durch die globalen Landmarken definierten, "Hälfte" der Umgebung welcher Zielpunkt zu finden ist.³⁹ Eine Wiederholung des Versuches in einer optisch unbegrenzten Umgebung würde diesen geometrischen Effekt deutlich verringern. Hierzu müsste das mit Hindernissen bestandene Gebiet deutlich vergrößert werden, um die Einschätzung der Randnähe zu erschweren. Außerdem müsste die Entfernung der globalen Landmarken so groß sein, dass innerhalb der für die Navigation zur Verfügung stehenden Umgebung keine Größenunterschiede wahrnehmbar sind. Damit könnte überprüft werden, ob die Verbesserung der winkelbezogenen Pointinggenauigkeit mit zunehmendem Abstand tatsächlich nur auf diesem geometrischen Effekt beruht. Dabei könnte, um den Trainingsaufwand nicht allzusehr zu vergrößern, der tatsächlich betretbare Bereich der Umgebung durchaus begrenzt bleiben, doch der Rand dürfte nicht auf Entfernung klar zu lokalisieren sein. Um zusätzlich Ortseffekte wie "einfach" und "schwierig" einzuordnende Gebiete untersuchen zu können, müssten viele, gleichmäßig verteilte Pointingpunkte getestet werden.

Dennoch basierte die Richtungseinschätzung nicht ausschließlich auf globalen Landmarken, andernfalls sollte die Bekanntheit der Pointingpunkte kaum eine Rolle spielen. Je häufiger man einen gegebenen Ort besucht hat, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Hindernisse oder die Gesamtkonstellation wiedererkannt werden können. Tatsächlich gaben die Probanden auch an, gelegentlich Hindernisse wiederzuerkennen und diese in ihren Entscheidungsprozess einzubeziehen. Auch bei der eindeutigen Wiedererkennung einzelner Hindernisse oder Plätze könnten die globalen Landmarken eine Rolle gespielt haben, etwa zur Unterscheidung verschiedener, ähnlicher, bekannter Ansichten. Ein solches Wiedererkennen würde eine Einordnung der eigenen Position jedoch nur dann erlauben, wenn die wiedererkannte Landmarke in Bezug zu den Zielpunkten gesetzt werden kann. Dies läßt sich durch mindestens drei unterschiedliche Repräsentationen der Umgebung erreichen.

Eine Variante besteht darin, einen bereits gespeicherten Vektor, der Richtung und Entfernung eines Zielpunktes angibt, abzurufen. Dies wäre möglich, wenn während der Trainingsnavigation bestimmten Orten bereits derartige, auf Wegintegration basierende Vektoren zugeordnet würden. Derartige Vektorkarten wurden beispielsweise von Hegarty u. a. (2002) beschrieben. Es handelt sich hierbei um eine andere Repräsentation als die Art Übersichtswissen, das durch Kartenstudieren gebildet wird und ist auch unterscheidbar von durch Navigation erlangtem Routenwissen (Thorndyke und Hayes-Roth 1982).

Auch wenn der Ort ohne einen bestehenden verbindenden Vektor zusammen mit den Zielpunkten in einer kognitiven Karte "eingezeichnet" ist, kann die Richtung bestimmt werden. Möglicherweise ließen sich diese beiden Repräsentationen über die "Bearbeitungszeit" unterscheiden (wobei zu erwarten wäre, dass es mehr Zeit braucht, einen neuen Vektor zu bilden, als einen vorhandenen abzurufen). Dies wurde allerdings in dem vorliegenden Aufbau wegen der langsamen Drehgeschwindigkeit nicht analysiert.

Auch wenn der wiedererkannte Ort Teil einer Route ist, die an einem der Zielpunkte endet, sollte sich aus deren Verlauf eine Richtung abschätzen lassen. Dazu muss es möglich sein, die Route mental abzulaufen, was etwa aufgrund einer rein auf der Bekanntheit von Ansichten basierenden Navigation (Cornell u. a. 1994) nicht zu erwarten wäre.

Demnach nutzten alle Probanden globale Landmarken und den Abstand zum Umgebungsrand für eine grobe Einschätzung der Region. Wiedererkannte lokale Landmarken oder Ansichten ermöglichten eine

³⁹ Anders als der Winkelfehler nahm der Distanzfehler mit wachsender Entfernung vom Zielpunkt zu. Auch dies läßt sich geometrisch erklären. Der maximale Distanzfehler, der gemessen werden kann, entspricht (da nur die Fehler kleiner 90° sinnvoll einbezogen werden können) dem Abstand zwischen Pointingpunkt und Ziel. Bei gleichbleibendem Winkelfehler nimmt dieser Fehler linear mit dem Abstand zum Zielpunkt zu.

feinere Einordnung und waren möglicherweise auch mit direkten Verbindungen zu den Zielpunkten assoziiert, sei es über einen Vektor oder über eine Route. Dabei lag der mittlere Pointingfehler aller Probanden (ohne IW25) bei der letzten Durchführung des Versuches bei $36.2^\circ \pm 9.8^\circ$ beim Pointen zum Nest und bei $27.7^\circ \pm 4.4^\circ$ beim Pointen zum Feeder. Auch dieser Fehler ist vergleichbar mit dem in realen Umgebungen ermittelten Pointingfehler von Cornell u. a. (2003). In diesem Experiment lag der ermittelte Winkelfehler für männliche Probanden bei 33° , für weibliche bei 47° . Eine Unterscheidung nach Geschlecht wurde im vorliegenden Versuch nicht vorgenommen, da der Datensatz sehr klein war. Der ähnliche Fehler spricht jedoch ebenso wie die Ähnlichkeit der genutzten Orientierungshilfen dafür, dass die Aufgabe zumindest in diesen beiden Versuchen im Realen wie im Virtuellen auf ähnliche Art und Weise gelöst wird.

Routenvariabilität Unter der Hypothese, dass die Probanden mit variablen Routen über ein größeres Übersichtswissen verfügen als diejenigen mit konstanten Routen, wäre zu erwarten, dass die Pointinggenauigkeit eine Abhängigkeit von der Ähnlichkeit der letzten Trainingsrouten erkennen lässt. Dies war jedoch nicht der Fall. Ebensowenig ließ sich nachweisen, dass besonders die Konstantrouter auf bekannte Orte angewiesen waren, dass also bei ihnen der Unterschied zwischen den Fehlern an unbekanntem und wohlbekanntem Positionen deutlich größer ist, als bei Probanden mit variablen Routen. Dies spricht, zusammen mit der Unveränderlichkeit des Winkelfehlers bei unterschiedlichen Trainingszuständen sowie der Tatsache, dass der Winkelfehler bereits beim ersten Pointen (2. Trainingstag) von unbekanntem Punkten aus deutlich besser als Chancelevel⁴⁰ ist, dafür, dass zum einen alle Probanden über ein grobes Übersichtswissen verfügen und dieses zum anderen kaum während des fortschreitenden Trainings verbessert wird. Demnach verbesserte sich in dem gegebenen Trainingsrahmen das lokale (Routen-) Wissen zwar deutlich, das Umgebungswissen jedoch wurde zu Beginn etabliert und dann kaum verfeinert.

Dieses gleichbleibende Niveau wurde auch in anderen Arbeiten gefunden. Als Beispiel seien hier Ishikawa und Montello (2006) genannt. Sie fuhren ihre Probanden entlang zweier unterschiedlicher Routen durch eine unbekanntes Wohngebiet, wobei sie auf verschiedene Landmarken aufmerksam machten. Für die Richtungsschätzungen erhielten die Probanden im Anschluss an die Tour ein Blatt mit den Namen zweier Landmarken. Sie sollten sich vorstellen, sie befänden sich auf der Route neben der ersten angegebenen Landmarke und sollten die Richtung zur zweiten Landmarke angeben. Der mittlere Winkelfehler betrug ungefähr 40° , wobei große individuelle Unterschiede bestanden. Die Genauigkeit wurde auch durch wiederholtes Training kaum besser.

Derartige Ergebnisse sprechen gegen die Annahme einer festen Lernsequenz, wie sie von Siegel und White (Siegel und White 1975) vertreten wurde (Landmarken \rightarrow Routen \rightarrow Übersichtswissen). Statt dessen scheinen unterschiedliche Repräsentationsformen (namentlich Routen und Übersichts- oder Kartenwissen) parallel aufgebaut zu werden (Aginsky u. a. 1997, Holding und Holding 1989). Ein grobes Übersichtswissen kann sogar bereits vor der Entwicklung von Routen zu bestehen. Dies wird in der vorliegenden Arbeit besonders deutlich am Beispiel von IW25, dessen Pointingfehler, obwohl er bis zuletzt keine Route aufgebaut hatte, mit 46° zum Nest bzw. 37° zum Feeder deutlich unter Chancelevel lagen. Allerdings wurde in dem vorliegenden Experiment bereits vor Beginn des Trainings eine grobe Angabe zur Position der Zielpunkte gegeben: die Probanden erhielten die Information, dass das eine Ziel (Nest) näher an der blauen und der gelben globalen Landmarke liege als das andere, welches Richtung rot und grün zu finden sei. Allein aufgrund dieser Angabe lässt sich, solange die globalen Landmarken sichtbar sind, eine Richtung angeben, die den Eindruck eines Übersichtswissens erweckt.⁴¹ Eine weitere mögliche Kritik an den wiederholten Pointingversuchen ist, dass durch die wiederholten Messungen das beobachtete System verändert worden sein könnte. Anders gesagt: Die Wiederholung der Richtungseinschätzung könnte dazu geführt haben, dass die Probanden stärker Übersichtswissen aufbauten, als sie es andernfalls getan hätten. Für das Verfolgen einer Route zwischen zwei unveränderlichen Punkten wie in der Trainingssituation ist ein Umgebungswissen, wie es in der Pointingaufgabe gefordert wurde, nicht unbedingt notwendig. Nach Passini wird jedoch vorwiegend das gelernt, was

⁴⁰Der mittlere Winkelfehler liegt bei gleichverteiltem Pointen, also ohne Richtungspräferenz, bei 90° . Bereits im ersten Pointingversuch, also am zweiten Trainingstag, erreichten die Probanden jedoch einen mittleren Fehler von 44° zum Nest bzw. 33° zum Feeder, wobei der schlechteste Proband (EH23) beim Pointen zum Nest einen Fehler von 74° zeigte.

⁴¹Die Genauigkeit einer Schätzung, die allein auf diesen Informationen beruht, wurde nicht bestimmt, so dass kein Vergleich zu den Probandendaten gezogen werden kann.

notwendig ist (Passini 1984, Aginsky u. a. 1997). Allerdings wäre im Falle einer erfolgreichen Anpassung der Repräsentation an diese Aufgabe eine Verbesserung der Pointinggenauigkeit zu erwarten.

Orientierungssinn Die Selbsteinschätzung der Probanden ihren Orientierungssinn betreffend erlaubte keine Voraussage über den mittleren Winkelfehler im Pointingversuch. Hegarty et al. (Hegarty u. a. 2002) dagegen fanden eine Korrelation zwischen dem anhand eines Fragekataloges ermittelten "Sense of Direction" (SOD, vgl. Muehl und Sholl 2004) eines Probanden und dem Winkelfehler dieses Probanden in einem Pointingexperiment. In diesem Experiment wurden den Probanden unmittelbar vor dem Versuch jeweils vier Landmarken außerhalb und innerhalb des Testraumes gezeigt. Auch zwischen einzelnen Messungsblöcken à 4 Richtungsangaben konnten die Probanden den Versuchsraum verlassen, um die gelernte Positionen aufzufrischen. Akustische wie visuelle Reize wurden mit Ohrenschützern und einer undurchsichtiger Brille oder Kappe beschränkt. Die Richtung wurde entweder durch eine Körperdrehung oder von Hand mit Hilfe einer "Pointingscheibe" angezeigt. Besonders die auf der Scheibe eingestellten (also nicht auf ohne visuelle Kontrolle durchgeführte Rotation angewiesenen) Richtungen zu Landmarken außerhalb des Hauses, beziehungsweise die dabei gemachten Winkelfehler, zeigten eine Korrelation mit dem jeweiligen SOD des Probanden (KK im Mittel -0.44). Abhängig vom Versuchsdesign und der Art, wie der Orientierungssinn der Probanden abgeschätzt wurde, wurden in einigen Arbeiten Korrelationen zwischen diesem Wert und der Leistung der Probanden im Versuch gefunden, in anderen dagegen nicht. Korrelationen wurden nach Hegarty et al. besonders dann gefunden, wenn Übersichtswissen verlangt wurde (für eine Zusammenfassung der Ergebnisse, vgl. Hegarty u. a. 2002). Dennoch wurde in dem vorliegenden Versuch kein Zusammenhang gefunden. Dies mag daran liegen, dass nur eine einzelne Frage gestellt wurde. Es blieb der freien Interpretation der Probanden überlassen, was genau sie unter "Orientierungssinn" verstanden und wie sie die Skala interpretierten.

Auch das Ergebnis des PTA-Testes korrelierte nicht mit den Pointingfehlern. Beide Maße waren also nicht geeignet, um bereits vor dem eigentlichen Experiment abzuschätzen, wie gut ein Proband die gestellte Pointingaufgabe lösen würde.

Folgender Versuch Alle Probanden zeigten in diesem Versuch, dass die Richtung der Ziele auch von unbekannt Positionen aus grob angegeben werden kann. Waren sie jedoch auch in der Lage, dort hin zu navigieren? Probanden mit gutem Übersichtswissen sollten hierbei auf direktem Weg zu den Zielen navigieren können, Probanden mit sicherem Routenwissen dagegen eher ihre Routen, wenn sie auf diese stoßen, erkennen und möglicherweise auch auf ihnen einfädeln. Um dies zu überprüfen wurde am letzten Trainingstag die Pointingaufgabe leicht abgewandelt; die Probanden sollten nun nach dem Pointen zum Nest zurück navigieren. Die Ergebnisse sind im folgenden Kapitel zusammengefasst.

7 Homing - Pointen mit anschließendem Rückweg zum Nest

7.1 Fragestellung und Durchführung

Bei der Pointingaufgabe (vgl. Kapitel 6) zeigten die Probanden, dass sie in der Lage sind, die Richtung zu den Zielpositionen auch von unbekanntem Punkten aus grob einzuschätzen. Im Folgenden sollte untersucht werden, welche Strategien sie verfolgten, um dann zum Nest zurück zu navigieren. Finden sie auf direktem Weg zum Ziel, oder laufen sie Umwege über bekannte Punkte? Wenn beispielsweise die Trainingsroute gequert wird, wird sie von den Probanden erkannt und genutzt? Unterscheiden sich die Strategien von Probanden mit konstanten und solchen mit variablen Routen voneinander? Eine gute Routenkenntnis, wie sie vor allem bei einer konstanten Trainingsroute zu erwarten ist, sollte dazu führen, dass diese nicht gekreuzt, sondern genutzt wird. Verlässliches Übersichtswissen dagegen sollte es ermöglichen, unabhängig von der eigentlichen Route direkt zum Ziel zu laufen.

Wie bereits im Pointingversuch hatten die Probanden die Aufgabe, von verschiedenen Punkten der Umgebung zu beiden Zielen zu deuten. Allerdings sollten sie diesmal im Anschluss zum Nest zurück laufen. Dazu erschien, nachdem die Richtung des zweiten Zieles bestätigt worden war als dritte Anweisung der Text "Laufe zum Nest!" auf dem Bildschirm. Sobald sie dieses erreicht hatten, wurde der Bildschirm schwarz und wie beim Pointen zwei Sekunden lang 'Warte!' eingeblendet. Der Versuch umfasste acht Durchgänge. Es sollte untersucht werden, welche Strategien die Probanden nutzten, um von beliebigen Punkten aus zum Nest zurückzufinden. Da das Einspuren auf den bestehenden Routen von besonderem Interesse war, wurden für jeden Probanden individuell acht Punkte ausgewählt, die vom Verlauf der jeweiligen Trainingsroute abhingen. Jeweils zwei lagen auf der Route (einer auf der zum Nest, einer auf der zum Feeder), zwei in unmittelbarer Nachbarschaft der Route (wiederum einer nah an der Route zum Nest, einer nah an der Route zum Feeder) und vier an weiter entfernten Punkten. Die Entfernung vom Zielpunkt war bei allen Punkten ähnlich. Die Reihenfolge der Punkte war randomisiert.

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Startrichtung

In den meisten Fällen verließen die Probanden die Delaunay-Dreiecke, von denen aus die Richtungen anzugeben waren, über denselben Schenkel, über den sie auch gepointet hatten.⁴² Dabei spielte es keine Rolle, ob die Richtung zum Nest als erstes oder zweites angegeben worden war. In sechs Durchgängen verließen die Probanden das Pointingdreieck über einen anderen Schenkel als sie zuvor angezeigt hatten. Bei vier dieser Fälle war die Richtung dennoch sehr ähnlich, eine sehr falsche Angabe wurde noch falscher "korrigiert" und ein Proband hatte zwei Mal in die gleiche Richtung (zum Feeder) gepointet und daher eine andere Richtung gewählt. In aller Regel wurde also die eigene Pointingangabe befolgt.

7.2.2 Charakterisierung der Trajektorien zum Nest

Die Trajektorien⁴³ wurden soweit möglich einer von drei Kategorien zugeordnet: Direkt, Kreuz, Fädeln. Eine "direkte" Route führte ohne Umwege zum Nest, ein "Kreuz" kreuzte die Trainingsroute des Probanden wenigstens ein Mal und eine "eingefädelt" Trajektorie verlief entlang der Trainingsroute, sobald diese getroffen wurde. Die drei Kategorien sind in Abbildung 55 (Seite 79) durch Beispieltrajektorien mit eingezeichneten Trainingsrouten veranschaulicht. Eine Trajektorie konnte in mehrere Kategorien fallen, etwa wenn die Route die direkte Strecke zum Nest angab, oder wenn die Route zunächst gekreuzt, später jedoch genutzt wurde, oder in keine Kategorie passen (in diesem Fall taucht sie in der Tabelle nicht auf). Tabelle 7 (Seite 79) enthält die Einteilung der einzelnen Probanden. Hier ist auch nochmals die Einordnung der Trainingsrouten (konstant oder variabel) aufgelistet. Zum Vergleich mit der Ähnlichkeit der Trainingsrouten wurde bestimmt, wieviel Prozent der acht Durchgänge in die jeweiligen Kategorie eingeordnet worden waren. Die Anteile keiner der drei Kategorien zeigte eine Korrelation mit der Ähnlichkeit der Trainingstrajektorien zum Nest, die Korrelationskoeffizienten betragen -0.16 (direkt), -0.20 (Kreuz), 0.44 (eingefädelt). IW25 wurde wieder ausgeschlossen, da der

⁴²Lag ein Hindernis (also eine Ecke des bewerteten Dreiecks) in Pointingrichtung, wurde die Loslaufrichtung dann als übereinstimmend gewertet, wenn der Proband direkt an dem entsprechenden Hindernis vorbei navigierte.

⁴³Alle Pointingrichtungen und Trajektorien sind in Anhang D.2.4 gegeben.

Vergleich mit den Trainingsrouten bei ihm nicht möglich war. Die Einzelwerte der Probanden sind in Abbildung 56 (Seite 80) dargestellt.

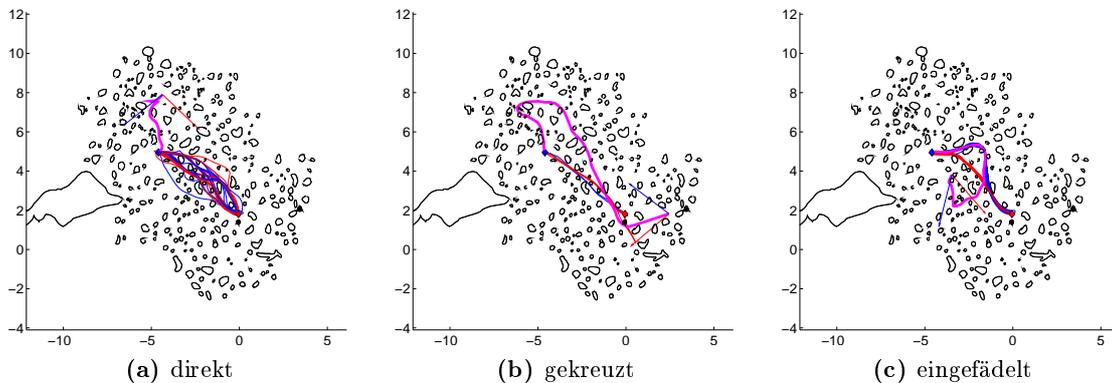


Abbildung 55: Beispiele für Homing-Trajektorien der Kategorien "direkt" (a; TS21, Durchgang 3), "gekreuzt" (b; SP20, Durchgang 4) und "eingefädelt" (c; FW23, Durchgang 1). Die Trajektorien des letzten Trainings sind in blau (zum Nest) und rot (zum Feeder) eingezeichnet, dieselben Farben haben die Zielpositionen selbst (durch entsprechend gefärbte Asterisken markiert), sowie die zugehörigen Pointingrichtungen (Pfeile). Die Homing-Trajektorien sind magenta. Sowohl die Pointingpfeile als auch die Homing-Trajektorien beginnen an den Pointingpunkten.

Tabelle 7: Charakterisierung der Wege zum Nest nach erfolgter Richtungsangabe. Die Nummern geben die Anzahl der Durchgänge der entsprechenden Kategorie an. "Direkt": direkte Navigation zum Nest, "Kreuz": Trainingsroute gekreuzt, "Fädeln": auf Trainingsroute eingespurt. +: trifft zu, - trifft nicht zu. *Hin* und *Rück* beziehen sich jeweils auf den Hin- und Rückweg der letzten Trainings Sitzung.

Proband	Homing			Training				
	Direkt	Kreuz	Route	Hin=Rück	gerade		konstant	
					Hin	Rück	Hin	Rück
AN19	5	4	1	-	-	-	+	+
AS25	5	3	4	-	-	-	-	-
BG27	4	3	5	+	-	-	+	+
EH23	2	3	4	-	-	-	-	+
FW23	4	2	8	-	-	-	+	+
IW25	1	- ^a	-	-	-	-	-	-
SM22	2	5	1	-	-	-	-	-
SN23	1	6 ^b	2	+	-	-	+	+
SP20	1	2	4	+	+	+	+	+
TK23	3	0	4	-	-	-	+	-
TS21	6	0	4	+	-	-	-	-

^a Unklar, da keine Route etabliert wurde

^b In zwei Durchgängen wurde die Route sogar zwei mal gekreuzt

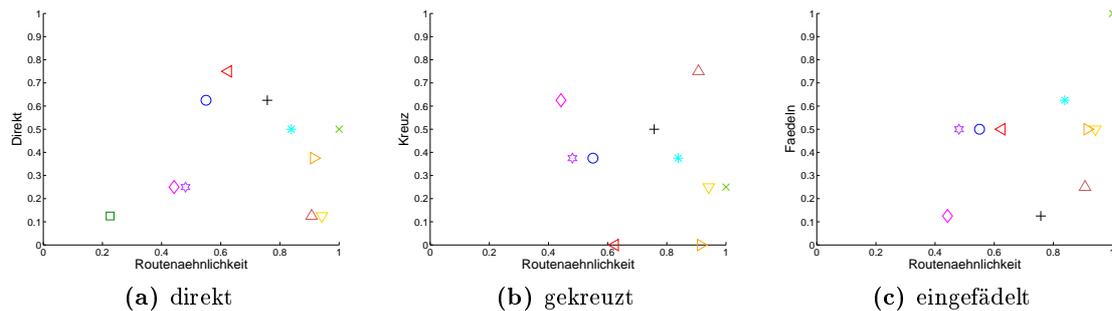


Abbildung 56: Vergleich der Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien der Probanden mit dem Anteil direkter (a), gekreuzter (b) und eingefädelter (c) Homing-Trajektorien. Beide Achsen beginnen bei 0 und enden bei 1, die x-Achse zeigt jeweils die Routenähnlichkeit im Training, die y-Achse den Anteil der beschriebenen Kategorie.

7.3 Diskussion

Repräsentation In diesem Versuchsteil sollte überprüft werden, wie die Probanden von Positionen, die sie nicht selbst angesteuert hatten, zu einer der Zielpositionen navigierten. Dabei spricht eine geradlinige Ansteuerung des Zieles, ähnlich wie eine gute Richtungsangabe beim Pointen, für ein gutes Übersichtswissen. Auch auffällige Landmarken nahe des Zielpunktes könnten ein direktes Ansteuern desselben ermöglichen, ohne dass Übersichtswissen notwendig wäre (*Zielführung*), derartige Landmarken waren jedoch nicht vorhanden. Die Verwendung der Trainingsroute dagegen spricht dafür, dass ein gutes Routenwissen besteht, welches auch das Erkennen der vertrauten Route von ungewohnten Ansichten gestattet. Außerdem ist ein derartiges Einfädeln nur möglich, wenn die Route an einem beliebigen Abschnitt aufgenommen werden kann. Dies wiederum sollte nur möglich sein, wenn Richtungsanweisungen tatsächlich mit Landmarken assoziiert wurden. Wenn dagegen eine reine Richtungsabfolge gespeichert würde, wie in dem Experiment von Iaria et al. (Iaria u. a. 2003, Etchamendy und Bohbot 2007), sollte unklar sein, an welcher Stelle der Sequenz eingesetzt werden muss. Eine derartige "ansichtsfreie" Routenrepräsentation ist in der vorliegenden Umgebung jedoch ohnehin schwer vorstellbar, da die lose verteilten Hindernisse keine eindeutigen Entscheidungspunkte (beispielsweise Kreuzungen in Labyrinthen oder Straßennetzen) lieferten. Ebenfalls für das Einspuren zu verwenden wäre eine bekanntheitsbasierte Navigation (Cornell u. a. 1994).

Alle Probanden (mit Ausnahme von IW25, bei dem die Auswertung nicht analog zu den anderen möglich war) zeigten sowohl direkte Verläufe wie auch Trajektorien, die auf den Trainingsrouten einfädelten. Nur TK23 und TS21 kreuzten dabei kein einziges Mal ihre Trainingsrouten. Anhand der Pointingdaten ließ sich kein Unterschied zu den Repräsentationen von Probanden mit konstanten und variablen Routen feststellen. Auch der Anteil der direkten bzw. eingefädelten Homing-Trajektorien erlaubte keine deutliche Trennung nach Ähnlichkeit der Trainingsrouten. Hier wäre am ehesten eine Korrelation zwischen dem Anteil eingefädelter Trajektorien und der Ähnlichkeit der Rückwege zu erwarten gewesen. Dieser Wert lag bei 0.44, was bestenfalls einer schwachen Korrelation entspricht. Möglicherweise läßt die Form der Verteilung der Anteile direkt zum Ziel navigierter Homing-Trajektorien (vgl. Abbildung 56a, Seite 80) erahnen, dass Probanden mit variablen Trainingsrouten (also mittleren Routenähnlichkeiten) tendenziell eher direkt auf das Ziel zusteuern. Allerdings ist der Datensatz zu klein, um klare Schlüsse ziehen zu können - sehr geringfügige Veränderungen der Daten würden bereits zu einem gänzlich anderen Bild führen. Auch die Einordnung der Trajektorien in die einzelnen Kategorien "von Hand" ließ einen breiten Spielraum.

Folgender Versuch In den vorangegangenen Kapiteln wurde deutlich, dass die Probanden gelernt hatten, wo die beiden Zielpunkte zu finden waren, also eine Erwartungshaltung zu den Zielpositionen entwickelt hatten. Als letzter Versuch soll nun untersucht werden, welche Strategien die Probanden bei einer gezielten Suche nach einem der Zielpunkte (dem Nest) anwandten.

8 Suche

8.1 Fragestellung und Durchführung

Es sollte überprüft werden, wie sicher die Probanden sich der Position des Nestes waren. Des Weiteren sollten menschliche Suchmuster um einen vertrauten Punkt untersucht werden.

Umgebung und Aufgabe der Probanden waren zunächst mit jeder Trainingssitzung identisch. Nach drei bis acht Durchgängen tauchte das Nest jedoch nicht mehr auf. Die Anzahl der Durchgänge hing dabei von der im Training zuletzt gezeigten Leistung des Probanden ab. Je sicherer er zwischen den Zielpositionen hin und her navigieren konnte, desto weniger Eingewöhnungsdurchgänge wurden gemacht, um zu verhindern, dass die Position zu exakt bekannt war. Die Probanden wurden nicht darüber informiert, dass das Nest verschwinden würde, vielmehr erhielten sie genau die gleichen Informationen wie zu jedem Training. Da die Suche so unauffällig wie möglich durchgeführt werden sollte, ersetzte sie im normalen täglichen Versuchsablauf eine Trainingssitzung. Sie wurde also zu dem Zeitpunkt durchgeführt, zu dem das nächste Training hätte absolviert werden müssen. Daher lagen nicht für alle Probanden tatsächlich identische Bedingungen vor. Bei allen Probanden, die eine gerade Anzahl von Trainingssitzungen absolviert hatten, lag das letzte Training bereits einen Tag zurück. Die Probanden mit ungerader Sitzungszahl dagegen absolvierten die Suche direkt im Anschluss an die letzte Trainingssitzung (5 Minuten Pause dazwischen). Gut 3 Minuten nach dem letzten Verlassen des Feeders wurde das Programm automatisch beendet und die Probanden über das fehlende Ziel informiert. Des Weiteren wurde ihnen mitgeteilt, dass in allen folgenden Versuchen beide Zielpunkte wieder auftauchen würden.

Zwei Probanden (AN19, FW23) wurde im Laufe des Versuches schnell klar, dass der Zielpunkt nicht auftauchte und teilten dies sofort mit. In diesen Fällen wurde das Experiment kurz darauf beendet.

8.2 Ergebnisse

8.2.1 Erste Durchgänge

Da während der ersten Durchgänge der Suche dieselben Bedingungen herrschten wie im Training, können sie als Fortsetzung des Trainings gesehen werden. Der Parameter, an welchem der Lernerfolg des Trainings gemessen wurde (vgl. Kapitel 3.2.4, Seite 24), gab die Anzahl der pro Minute zurückgelegten Pfade wieder. Die Entwicklung dieser "Leistung" ist für die einzelnen Probanden in Abbildung 57a auf Seite 82 dargestellt. Die meisten Probanden zeigten im Vergleich zum Training eine weitere Verbesserung. So erfüllten AN19 (schwarzes Pluszeichen⁴⁴), SM22 (rosa Raute) und TK23 (orangenes Dreieck nach vorne) erst während der ersten Suchdurchgänge in beiden Richtungen das für das Training geltende Lernkriterium von zwei Durchgängen pro Minute. Das Training von AN19 und TK23 war vorzeitig beendet worden (nach jeweils sechs Sitzungen), da sie sich deutlich langweilten und Leistungseinbrüche befürchtet worden waren. SM22 dagegen hatte an neun regulären Sitzungen teilgenommen und damit das Zeitlimit erreicht. Zwei Probanden waren während der Suche schlechter als während der letzten Trainingssitzung. TS21 (rotes Dreieck nach hinten) verschlechterte sich bei den Pfaden zum Nest leicht, IW25 brach auf den Pfaden zum Feeder deutlich ein, von 1.5 bis auf das Niveau der Rückwege von ungefähr 0.3 Pfaden pro Minute. Im Tagesmittel verbesserten sich alle Probanden, mit Ausnahme von IW25.

Die Ähnlichkeit der Pfade fiel bei vier Probanden in beiden Richtungen ab. Bei SP20 stieg sie auf den Rückwegen gering an, die Wege zum Feeder sind dagegen unterschiedlicher als im Training.⁴⁵

Bei vier Probanden verliefen die Pfade während der ersten Durchgänge der Suche deutlich ähnlicher als im Training. Hier ist besonders auf SM22 hinzuweisen, der während dieses Teilversuches deutlich sicherer durch die Umgebung zu navigieren vermochte als im Training. Die Pfade von IW25 blieben dagegen auch in der Suche sehr unsicher, die Ähnlichkeit also entsprechend gering. Die Unsicherheit über die Zielposition war bei diesem Probanden nach wie vor so groß, dass keine "gezielte" Suchstrategie vorliegen konnte.

⁴⁴Die Farbcodierung der Probanden ist dieselbe wie in den vorangehenden Kapiteln. Sie ist in Anhang A aufgelistet.

⁴⁵Im Training wurden nur jene Pfade für die Ähnlichkeitsbestimmung verwendet, deren Länge um nicht mehr als 2 Standardabweichungen vom Sitzungsmittelwert abwich. Bei der Suche wurden dagegen wegen der geringen Datenmenge alle Pfade verwendet. Die im Vergleich zu Training geringere Ähnlichkeit lässt sich jedoch nicht allein durch die bei den Trainingsrouten getroffene Vorauswahl erklären. Obwohl durch eine analoge Vorauswahl bei der Suche die Ähnlichkeit etwas steigt (Daten nicht gezeigt), blieb der Trend auch in diesem Fall unverändert.

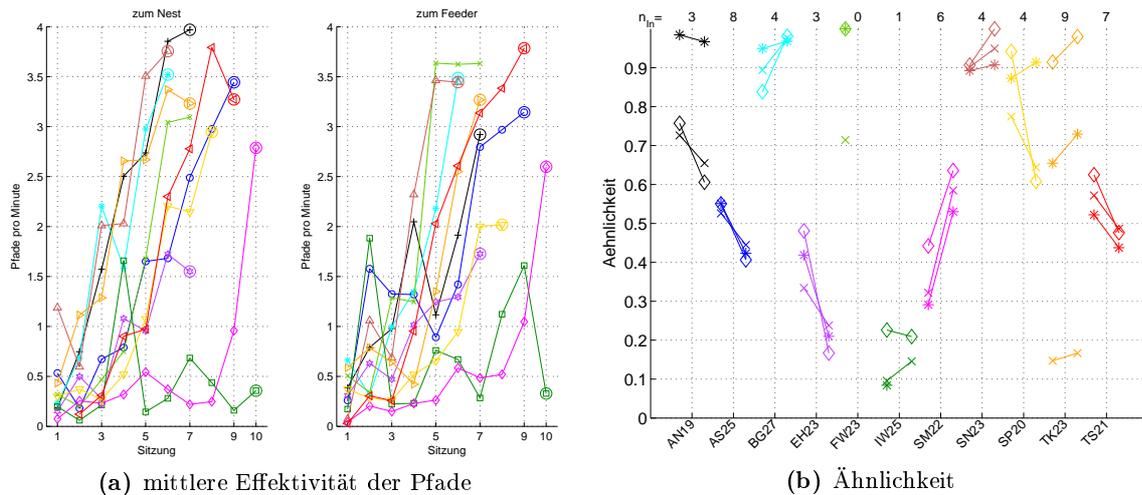


Abbildung 57: Vergleich des Trainings mit den ersten Durchgängen während der Suchbedingung. **a:** Mittlere Leistung der Probanden (Anzahl der pro Minute zurückgelegten Pfade, Farbcodierung vgl. Anhang A). Die Mittelwerte der ersten Suchdurchgänge, während welcher beide Zielmarker noch wie im Training erschienen, sind durch einen Extrakreis markiert. Die restlichen Datenpunkte entsprechen den Mittelwerten der einzelnen Trainingssitzungen. In der **linken** Abbildung sind die Pfade zum Nest zusammengefasst, **rechts** die zum Feeder. **b:** Vergleich der Ähnlichkeit der letzten Trainingstrajektorien (jew. linker Punkt) mit der Ähnlichkeit der vor dem eigentlichen Suchdurchgang vervollständigten Pfade (jew. rechter Punkt). Für die Ähnlichkeit der Suchdurchgänge wurden alle Pfade verwendet. Das angegebene n gibt die Anzahl der Pfade zum Nest an (*). Zum Feeder (\diamond) konnte auch der letzte Durchgang verwendet werden, daher ist n hier jeweils um 1 größer. Wie im Training wurde auch die Ähnlichkeit der Hin- und Rückwege bestimmt (\times). Die Auswertung der Trainingspfade umfasst dagegen nur die Pfade, deren Länge nicht mehr als 2 Standardabweichungen von der mittleren Pfadlänge der letzten Trainingssitzung dieses Probanden abwich. Für FW23 gibt es keine Suchdaten, für IW25 liegt zum Nest nur 1 Pfad vor, so dass hier keine Ähnlichkeit bestimmt werden konnte.

8.2.2 Suchstrategien

Mit Ausnahme von IW25 und EH23 liefen die Probanden im Suchdurchgang zunächst direkt zum Nest (vgl. Abbildung 58a, Seite 83). Da der Zielmarker nicht auftauchte, begannen sie dort mit einer gerichteten Suche. Alle Probanden mit Ausnahme von IW25 zeigten sich rasch verwirrt. Typische Kommentare waren beispielsweise "hä?", "hier war doch...", oder "das Programm spinnt.". Einige Beispiele sind auch in Tabelle 8 (Seite 83) aufgelistet.

Die abgesuchte Fläche nahm während der Suche immer mehr zu. Für diese Auswertung wurde nur der Teil der Trajektorie zur "Suche" gezählt, der entstand, nachdem die Distanz des Probanden vom Ziel (Nest) einmal einen Schwellenwert von 0.5 Entfernungseinheiten unterschritten hatte. Ab diesem Zeitpunkt wurde alle 30 Schritte eine neue Fehlerellipse über die gesamte bisherige Suche berechnet. Die Flächen der resultierenden Ellipsen sind in Abbildung 58b (Seite 83) dargestellt. Die Fläche der Fehlerellipse des gesamten letzten Pfades, also bereits ab dem Feeder, betrug im Mittel $9.8 EE^2 \pm 2.0 EE^2$. Die Flächen unterschieden sich nicht signifikant von den Fehlerellipsenflächen der in der letzten Trainingssitzung produzierten Trajektorien zum Nest (Wilcoxon: $p \approx 0.06$).

Die Probanden verfolgten auf der Suche unterschiedliche Strategien. Nur ein Proband schien die Umgebung des Nestes nicht erkannt zu haben. Er (IW25) näherte sich zwar dem korrekten Platz an, verweilte dort aber nicht, sondern lief gleich weiter. EH23 kam nicht einmal in die Nähe des betreffenden Platzes. Die Suchtrajektorien der restlichen Probanden dagegen waren so angelegt, dass der Schwerpunkt der bereits beschriebenen Suchellipsen während der 2-3 minütigen Suche nie mehr als 1 Entfernungseinheit von der Zielposition entfernt lag. Demnach suchten sie besonders im Bereich der gewohnten Zielposition. Dies wird auch in Abbildung 58a (Seite 83) deutlich: Die Entfernung zum Nest wird bei nahezu allen Probanden immer wieder sehr klein.

Für die Gesamtsuche fallen drei verschiedene Strategien auf, die mitunter vermischt wurden: Sechs der elf Probanden suchten während der Suche den Feeder wieder auf,⁴⁶ oder liefen zumindest ein Stück

⁴⁶Auch FW23, dessen Trajektorien verloren gegangen sind und der daher nicht in die Auswertung mit einbezogen werden kann, nutzte diese Strategie, was bereits während des Versuches mitprotokolliert wurde.

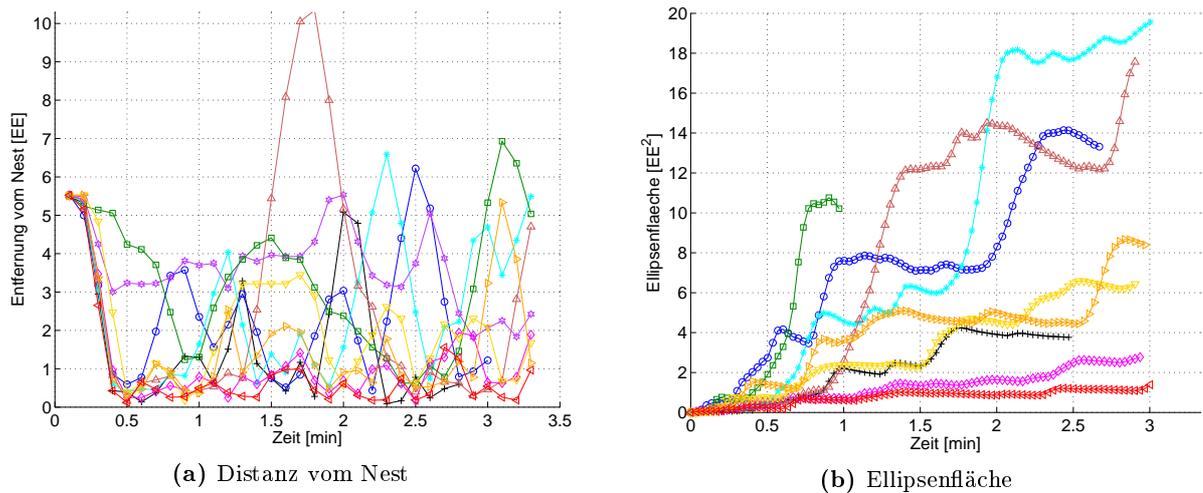


Abbildung 58: **a:** Abstand der virtuellen Probandenpositionen vom Nest gegen die Zeit. Man beachte das wiederholte Absinken der Distanz bei vielen Probanden bis nahe 0. **b:** Entwicklung der Flächen der Suchellipsen gegen die Zeit. Ausgewertet wurden nur die Teile der Trajektorien, die entstanden, nachdem der Proband einmal bis auf 0.5 Entfernungseinheiten an das Ziel (Nest) herangekommen war. Die Zeit ist in Minuten angegeben, Abstände sind in virtuellen Entfernungseinheiten (EE) gemessen.

weit in die entsprechende Richtung und dann erneut zum Nestplatz (vgl. Abbildung 59a, Seite 84). Dabei liefen die Trajektorien bei vier Probanden (sowie bei FW23) eher direkt auf den Feeder zu, bei zwei weiteren lagen weite Strecken zwischen dem Verlassen des Nestplatzes und dem Erreichen des Feeders.

Ein Proband (TS21) lief von dem vermuteten Zielplatz aus sternförmig in verschiedene Richtungen und kehrte dabei durch Rückwärtslaufen auf der eben gelaufenen Spur immer wieder zum Ausgangspunkt zurück (Abbildung 59b, Seite 84).

Andere beschrieben einen Bogen, anstatt geradlinig vom Zielplatz wegzulaufen. Bei fünf Probanden führte dieser Bogen in der Regel zurück zum Nestplatz (Abbildung 59c, Seite 84), der Rest entfernte sich immer weiter vom Ziel und kam erst nach längeren Wegen wieder zurück.

Einzelne Plätze wurden entweder rasch überlaufen, oder durch kleine sternchenförmige Suchen zuverlässig abgedeckt. Dies konnte notwendig sein, da der Zielmarker im Training nur bei ausreichend kleiner Distanz zu sehen war. Bei einer einfachen Spur konnte es vorkommen, dass man sich zwar auf dem korrekten Platz befand, jedoch den Zielpunkt übersah, weil die Distanz, in der der Marker auftauchte, nicht unterschritten wurde.

Tabelle 8: Beispielkommentare der Probanden

Verwirrung	AS25	"Hä?"
	SN23	"Hier muss sie sein."
	TK23	"Das ist ja komisch!"
	SM22	"Sag mal..."
Zweifel an der eigenen Position	BG27	"Hab mich kurz ablenken lassen"
	SP20	"Ok, hier müßt's sein... Problem is halt, wenn ich mich wie jetzt einmal verlaufen hab, dann hab ich gar keine Orientierung mehr."
Zweifel am Programm	TK23	"Das Programm spinnt."
	AN19	"Ich bin mir aber hundert prozentig sicher, dass HIER mein Zuhause ist! Ich kann auch noch mal zum Feeder laufen und's dir zeigen! Guck! (...) und HIER ist mein Zuhause!"

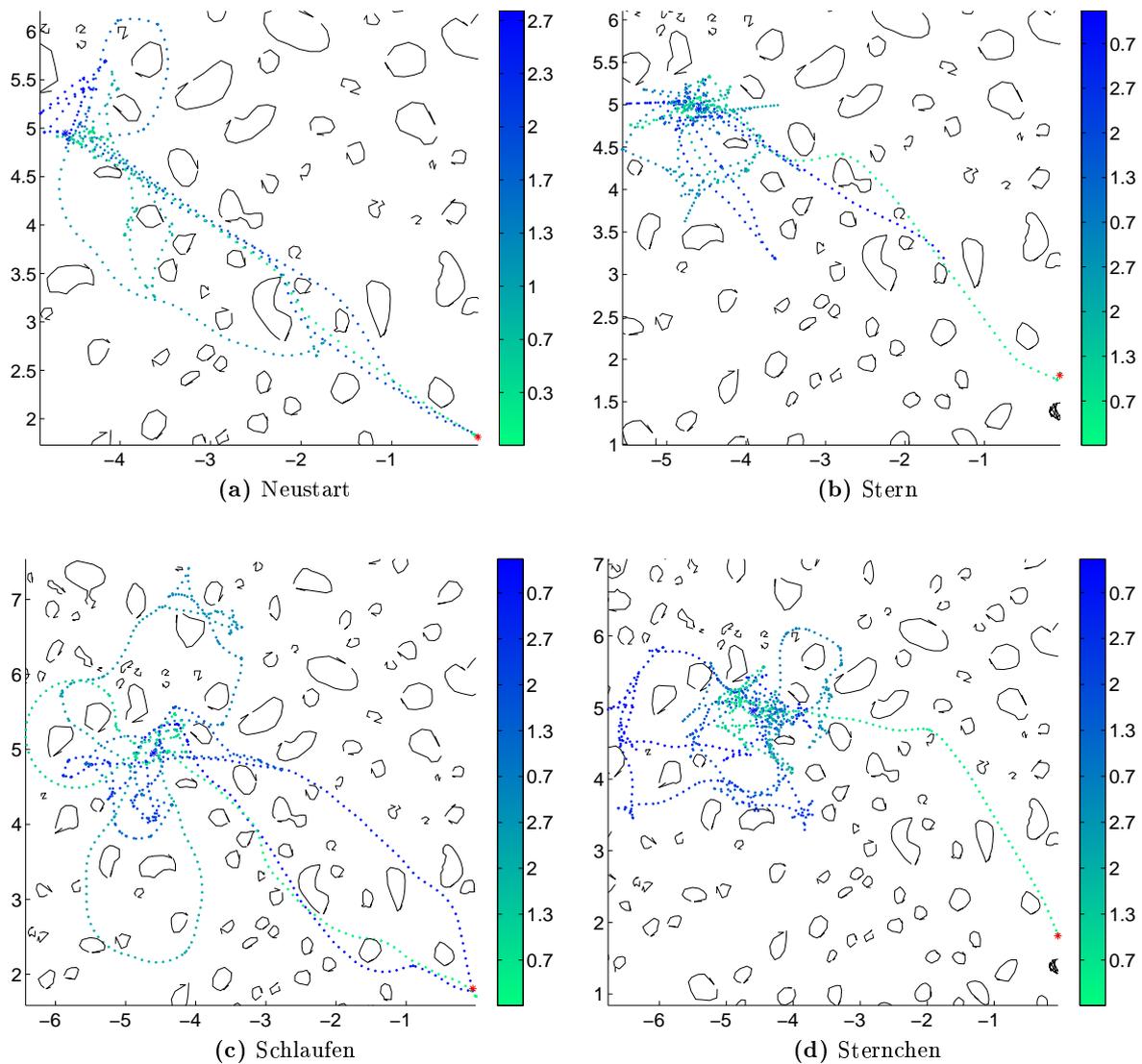


Abbildung 59: Verschiedene Suchmuster. **a:** Erneutes Anlaufen des Zieles nach Rückkehr zum Startpunkt. Dabei wurde der Startpunkt (Feeder) nicht in jedem Fall tatsächlich angelaufen, manchmal fädelt ein Proband auch irgendwo auf der Strecke auf seine Trainingsroute ein und folgte ihr wieder zum Nestplatz. (Suche von AN19.) **b:** Geradliniges Verlassen des Zielplatzes und anschließende Rückkehr durch Rückwärtslaufen. (Suche von TS21.) **c:** Schlaufenförmige Suchabschnitte. Das Zentrum der Suche liegt auch hier auf dem Nestplatz. (Suche von TK23.) **d:** Sternchenförmiges Suchmuster. (Suche von SM22.) In allen Abbildungen ist die zeitliche Reihenfolge durch den Farbverlauf angedeutet. Am Startpunkt ist die Trajektorie grün, im Verlauf der Suche wird sie zunehmend blauer. Man beachte die unterschiedlichen Skalen der Abbildungen.

8.3 Diskussion

Durch das unangekündigte Entfernen eines der beiden Ziele sollten die Probanden zu einer gerichteten Suche nach diesem Zielpunkt animiert werden.

Wissensstand AN19 und TK23 widerlegten dadurch, dass sie bei den ersten Durchgängen der Suche das Trainingsziel erreichten, die Annahme, ihre Leistung würde sich aus mangelndem Interesse ohnehin nicht weiter steigern. Im Nachhinein war es also voreilig, sie verfrüht aus dem Training zu nehmen.

Während die Probanden zu Beginn des Trainings die gesamte Umgebung nach dem Zielpunkt absuchten, war die Suche in diesem Teilversuch, der nach Abschluss des Trainings stattfand, deutlich konzentrierter. Dies spricht dafür, dass die Probanden eine Erwartungshaltung bezüglich der Zielposition aufgebaut hatten. Des Weiteren äußerten sich alle Probanden mit Ausnahme von IW25, der durch mangelnden Lernerfolg auch keine Erwartungshaltung über die Zielposition hatte aufbauen können, sehr schnell verwirrt über den fehlenden Zielpunkt. Allerdings gab auch EH23 an, der Nestmarker würde fehlen, obwohl er den Nestplatz während der gegebenen Such-Zeit nie erreichte. Er hatte offensichtlich den Zielplatz verwechselt.

Suchmuster Es wurden unterschiedliche Strategien bei der Suche eingesetzt. Eine Strategie bestand darin, die eigene Position nochmals zu überprüfen, indem Bezug zu einer eindeutig identifizierbaren Region genommen wurde. So suchten sechs Probanden den Feeder wieder auf. Einige liefen nur ein Stück weit in die entsprechende Richtung, um dann auf ihrer Trainingsroute wieder zum Nestplatz zurückzukehren. Diese Taktik scheint von vier dieser Probanden⁴⁷ absichtlich angewandt worden zu sein. Zum einen liefen sie jeweils sehr direkt auf den Feeder zu und von dort wieder zum Nest, zum anderen spricht der letzte in Tabelle 8 (Seite 83) angegebene Kommentar von AN19 dafür, dass es sich in der Tat um eine bewusste Überprüfung der Position handelte. Die beiden anderen Probanden, die den Feeder nochmals aufgesucht hatten, kamen dagegen im Verlauf längerer Trajektorien abseits beider Zielpositionen zum Feeder, um von dort zielstrebig zurück zum Nest zu laufen. In diesen Fällen scheint das Zurücklaufen eher zufällig erfolgt zu sein. Die Suche selbst verlief in einem Fall wie auf den Speichen eines Rades, dessen "Nabe" auf dem Nestplatz lag. Die Fläche der abgesuchte Umgebung wuchs immer wieder sprunghaft an. Das abgesuchte Areal wurde also immer wieder um neue Bereiche erweitert. In der beschriebenen "Speichensuche" waren diese Stufen besonders klein, die abgesuchte Umgebung wurde also nur sehr zögerlich erweitert. Suchtrajektorien sind im Tierreich häufig so ausgerichtet, dass ein derart "gewichtetes" Bild entsteht, dessen Schwerpunkten in den Bereichen liegen, in denen die Suche besonders erfolgversprechend ist (vgl. beispielsweise Benhamou 1994). Bei Ameisen (*Cataglyphis forits*) lässt sich die Suche um einen Erwartungspunkt (als Endpunkt des Heimvektors codierte erwartete Position des Nestes) als Spirale darstellen, die immer wieder abgebrochen und neu begonnen wird, so dass die Suchdichte der Ameise im Zentrum der Spirale am größten ist (Müller und Wehner 1994). Hoffmann (Hoffmann 1983) beschreibt die Suche einer Wüstenassel (*Hemilepistus reaumuri*) nach ihrem als Sonnenschutz überlebenswichtigen Versteck als Spirale, die später von schlaufenförmigen Mustern abgelöst werden. Auch hier wird das Zentrum der Suche immer wieder aufgesucht. Möglicherweise liegt auch diesem Muster eine immer wieder abgebrochene Spirale zugrunde, wie sie von Müller und Wehner für *Cataglyphis* beschrieben wurde (Müller und Wehner 1994). Derartige Schlaufen sollten jeweils zu einer sprunghaften Erweiterung des abgesuchten Bereiches und damit zu einer stufenförmigen Vergrößerung der Fehlerellipsen führen, ähnlich der hier beobachteten. Für einen weitergehenden Vergleich dieser Suchstrategien sind jedoch weitere Analysen der Daten notwendig.

⁴⁷sowie FW23, dessen Werte abhanden gekommen sind

9 Gesamtdiskussion und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Navigationsverhalten von Menschen in einer virtuellen Umgebung untersucht. Die Aufgabe bestand darin, wiederholt zwischen zwei festen Zielpunkten hin und her zu navigieren. Die Objekte, welche die Zielpunkte markierten, waren nur aus nächster Nähe sichtbar und lagen zwischen unregelmäßig verteilten Hindernissen, die sich nur durch ihre Umrisse voneinander unterschieden. Eine grobe "Kompassrichtung" war durch vier farblich unterschiedliche Säulen im Hintergrund gegeben. Obwohl die Strecke in 11 Sekunden zu bewältigen war und nahezu geradlinig verlaufen konnte, benötigten die Probanden mehrere 20-minütige Trainingssitzungen, um sie zu beherrschen. Ein Proband schaffte es während den vorgegebenen fünf Tagen gar nicht, die Aufgabe zu meistern. Trotz der kurzen Strecke war die Aufgabe demnach nicht einfach zu lösen.

Dies mag besonders an der Struktur der Umgebung gelegen haben. Viele Navigationsexperimente mit menschlichen Probanden finden innerhalb von Gebäuden, in einem Straßennetz oder ähnlichen anthropogenen Umgebungen statt (beispielsweise in den Versuchen von Aginsky u. a. 1997 in einem virtuellen Straßennetz oder Cornell u. a. 1994 auf einem Universitätscampus). Die hier verwendete Umgebung ist dagegen eher mit natürlichen Landschaften wie Wäldern oder Felslabirinth zu vergleichen, ohne allerdings eine vergleichbare Variabilität (verschiedene Baumarten, Unterwuchs, Bodenneigung etc.) zu bieten. Ein wichtiger Unterschied liegt darin, dass die unregelmäßige Verteilung der ebenso unregelmäßigen Hindernisse weder die festen, in Städten durch Straßen bedingten Wege, noch vorgegebene Entscheidungspunkte (etwa durch Kreuzungen) bietet. Dadurch ist die Variabilität der möglichen Wege und mit ihr anscheinend auch die Komplexität sehr hoch.

Eine weitere Schwierigkeit bestand in der Ähnlichkeit und Abstraktheit der Hindernisse mit ihrer einheitlichen Höhe und Textur. Die Hindernisse ließen sich nicht gebräuchlichen Kategorien zuordnen, wie das etwa in einer Stadt durch verschiedene Läden, Wohnhäuser oder besonders große Gebäude der Fall wäre, deren Kategorisierung aus dem täglichen Leben bekannt und erprobt ist. Die Probanden mussten erst lernen, anhand welcher Merkmale sie die Hindernisse unterscheiden konnten. Erst mit zunehmender Erfahrung wurden Kategorien (wie beispielsweise "Säule" für eher schmale und "Wand" für langgezogene Hindernisse) eingeführt, die sich teilweise von Proband zu Proband unterschieden, teilweise wiederholten. Auch die Konstellationen mehrerer Hindernisse zueinander wurden kategorisiert. Hier tauchten besonders häufig die Begriffe "Tunnel" und "Platz" auf.

Führte diese wenigstens anfängliche Unsicherheit dazu, dass vermehrt globale Landmarken, namentlich die vier Säulen, die leicht anhand ihrer Farbe unterschieden werden konnten, zur Orientierung genutzt wurden, oder konnten die Hindernisse dennoch als Navigationshilfen dienen?

Den Angaben der Probanden zufolge wurden zu Beginn des Trainings nur die globalen Landmarken genutzt. Dies war allerdings, unabhängig von der Unterscheidbarkeit der Hindernisse, zu erwarten, da die einzigen Informationen (vgl. Anhang C.1), welche die Probanden zu diesem Zeitpunkt über die Lage der Zielpositionen hatten, sich auf eben diese globalen Landmarken bezogen.⁴⁸ Im weiteren Verlauf des Trainings wurden zunehmend lokale Landmarken als Orientierungsstützen genannt, bis sie schließlich die globalen Landmarken weitestgehend abgelöst hatten.

Die Bedeutung lokaler Landmarken wurde beispielsweise in dem nach Abschluss des Trainings durchgeführten Nebelversuch deutlich. Einige Probanden, besonders die mit konstanten Trainingsrouten, konnten ihren vertrauten Weg zwischen den beiden Zielpunkten auch gänzlich ohne globale Landmarken finden. Andere dagegen waren so verwirrt, dass sie, obwohl sie den Weg letztlich fanden, deutlich mehr Zeit benötigten als unter Trainingsbedingungen. Sie waren demnach für eine erfolgreiche Orientierung nach wie vor auf mehr als die unmittelbar umgebenden Hindernisse angewiesen.

Auch die Ergebnisse des Pointingversuches sprechen dafür, dass lokale wie globale Landmarken gemeinsam genutzt wurden: Die Anzahl der globalen Landmarken, die am Pointingpunkt sichtbar waren, hatte ebenso einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Richtungsangabe wie die Bekanntheit des Ortes. Da die Ansicht der globalen Landmarken und der Abstand zum Rand sich zwischen zwei benachbarten Orten unterschiedlicher Bekanntheit nur geringfügig unterschied und kein Zusammenhang zwischen der Anzahl sichtbarer globaler Landmarken und der Bekanntheit eines Ortes bestand, läßt sich der Einfluss der Bekanntheit auf die Pointinggenauigkeit nur erklären, wenn auch die lokalen Landmarken genutzt wurden.

⁴⁸Zwei der Probanden (AN19 und SN23) gaben jedoch an, die entsprechenden Informationen trotz Aufforderung nicht gelesen zu haben. Dennoch orientierten sich auch diese beiden zu Beginn an den globalen Landmarken - gerade AN19 zeigte durch seine "Orientierungsblicke" (vgl. Abbildung 7, Seite 23) ab der zweiten Trainingssitzung eine deutlich von den globalen Landmarken abhängige Orientierungsstrategie.

Die globalen Landmarken boten eine grobe Orientierungsstütze, und zwar bereits zu Beginn des Trainings (der erste Pointingversuch fand am zweiten Trainingstag statt), während die Hindernisse für eine feinere Orientierung genutzt werden konnten. Dies zeigte sich besonders in der Verbesserung der Navigation während des Trainings, die nur durch eine zunehmend exakte Orientierung möglich war. Die subjektive Einschätzung der Probanden, zu Beginn vorwiegend globale, später zunehmend lokale Landmarken zu verwenden, bestätigte sich also in den Daten.

Was bedeutet dieser Wechsel von einer zunächst globalen zu einer zunehmend lokalen Orientierung für die mentale Repräsentation der Umgebung? Obwohl für die Navigation zwischen den beiden Zielpunkten kein Übersichtswissen notwendig gewesen sein sollte, müssen die Probanden bereits zu Beginn des Experimentes eine grobe Übersicht über die Umgebung ausgebildet haben, da sie bereits am zweiten Tag in der Lage waren, die Richtung zu den beiden Zielen auch von unbekanntem Plätzen aus anzugeben. Erst später etablierte sich eine Route und ein feineres lokales Wissen über einzelne Hindernisse. Ab der ersten Durchführung des Pointingversuches könnte dieser dazu geführt haben, dass die Probanden als Vorbereitung der nächsten Pointingaufgabe stärker versuchten, ihr Übersichtswissen zu verbessern, als es für die reine Trainingsaufgabe notwendig gewesen wäre. Dennoch konnte die Gesamtübersicht nicht signifikant verbessert werden - die Fehler im Pointing blieben auch mit zunehmendem Training ähnlich. Die Sicherheit beim Folgen der Routen dagegen nahm weiterhin zu. Auch Wiener u. a. (2004) beschreiben in ihrem ersten Experiment, dass die Regionalisierung der Umgebung von den Probanden bereits sehr frühzeitig (während des ersten Durchganges) erlernt wurde, was sich darin äußerte, dass die Erkennung der Zugehörigkeit unbekannter Plätze zu bekannten Regionen ein schnelleres Auffinden der Plätze ermöglichte.

Bei Vögeln wurde vorgeschlagen, dass sie über eine unter Umständen sehr große, grobe *grid map* und eine deutlich feinere *mosaic map* für besonders gut bekannte Regionen - wie das Gebiet rund um den heimatlichen Schlag bei Brieftauben - verfügen. Die *grid map* wird dabei durch mehrere (mindestens zwei) durch die Umwelt gegebene Gradienten gebildet, deren Gefällrichtung den Vögeln "bekannt" ist. Durch Vergleich der Gradienten an der momentanen Position mit den am Heimatort gegebenen Gradienten kann die Heimrichtung bestimmt werden. Dies funktioniert jedoch nur in einiger Entfernung zum Heimatort, da bei größerer Nähe die Unterschiede zu gering sind. In bekannteren Gegenden (also gerade um den Heimatort) wird eine *mosaic map* genutzt. Sie enthält Informationen über Landmarken. Dabei wird, wo möglich, das Landmarkenwissen mitverwendet, was eine genauere Navigation ermöglicht. Sehr junge, unerfahrene Brieftauben etwa verlassen sich für die Heimkehr noch gänzlich auf Wegintegration und das Erdmagnetfeld, mit zunehmender Erfahrung greifen sie jedoch auf Landmarkenwissen zurück. (Für eine weitergehende Zusammenfassung vgl. Wiltschko und Wiltschko 1999). Vermutlich verfügen auch Menschen über mehrere, unterschiedlich feine "Karten" oder "Graphen", die parallel zur Verfügung stehen und je nach Aufgabe flexibel genutzt werden können (vgl. beispielsweise Wiener und Mallot 2003). Bereits während der ersten Kontakte mit einer unbekanntem Umgebung scheint ein grobes Referenzsystem festgelegt zu werden. Es ist in der hier verwendeten Umgebung durch die vier farbigen Säulen, möglicherweise auch durch die Begrenzung der hindernisbestandenen Umgebung vorgegeben. In natürlichen Umgebungen könnte es sich auf markante, größere Merkmale wie einen Flusslauf, eine Bergkette, aber auch auf einen Kompass beziehen. Eine derartige Übersicht könnte außer einem Referenzsystem auch grobe Regionen beinhalten oder aus solchen zusammengesetzt sein. Sie behält auch nach längerem Training eine grobe Struktur und könnte, ähnlich wie die *grid map* der Vögel, besonders für eine Orientierung an unbekanntem Positionen genutzt werden. Für die exakte Navigation innerhalb von Regionen wird jedoch eine feinere Repräsentation benötigt. Derartige Informationen über besonders gut bekannte Gebiete oder den genauen Verlauf einer Route scheinen von dieser groben Übersicht getrennt repräsentiert zu werden. Sie werden gesammelt, sobald sie zur Verfügung stehen (in dem Experiment von Ishikawa und Montello (2006) etwa waren die Probanden bereits nach dem ersten Training in der Lage, relevante Landmarken in der korrekten Reihenfolge wiederzugeben, während in dem mit der vorliegenden Arbeit vorgestellten Experiment durch die große Fremdheit und Ähnlichkeit der Hindernisse erst nach mehreren Sitzungen einzelne Landmarken benannt und wiedererkannt wurden) und ständig erweitert. Der Bezug zu einem bestehenden Referenzsystem oder die Zugehörigkeit zu bestimmten Regionen könnte dabei das Erlernen neuer Orte vereinfachen (Wiener u. a. 2004).

Für Routenplanungen wurden unterschiedliche, hierarchisch aufgebaute Modelle vorgeschlagen. Auch diese Modelle basieren darauf, dass unterschiedlich feine Repräsentationen der Umgebung bestehen. Bei der von Wiener und Mallot (2003) vorgeschlagenen fein-nach-grob-Planung etwa wird der genaue Verlauf des Weges nur für die nächste Umgebung festgelegt. Für weiter entfernte Streckenabschnitte

beschränkt sich die Planung auf grobere Einheiten wie beispielsweise Regionsverbindungen. Erst wenn der entsprechende Bereich betreten wird, für weitere Richtungsentscheidungen also gewissermaßen eine höhere Auflösung benötigt wird, findet eine Feinplanung statt - letztlich analog der Verwendung einer Deutschlandkarte für die Strecke zwischen Tübingen und Berlin und der Verwendung höher auflösender Teilkarten für die Besichtigung eines Schlösschens irgendwo auf der Strecke und letztlich eines Berliner Stadtplanes um vor Ort die Straße mit dem Hotel zu finden.

Da die in der vorliegenden Arbeit verwendete Umgebung nur zwei Kategorien beinhaltete, nämlich eine grobe Regionalisierung durch globale Landmarken und Begrenzung der Umgebung und die Feinstruktur durch die lokalen Hindernisse, kann hier nicht genauer überprüft werden, ob der Lernvorgang tatsächlich streng "hierarchisch" organisiert ist. Es wäre interessant, ob die Reihenfolge der während des Lernvorganges zur Orientierung genutzten Systeme auch dann streng von grob nach fein geordnet wären, wenn mehrere derartige Systeme (zusätzlich beispielsweise in Farbe oder Höhe unterscheidbare Regionen) zur Verfügung stünden. Dies würde bedeuten, dass nicht die einzelnen, letztlich innerhalb einer Region liegenden Plätze die Region definieren, sondern dass die Region bereits als solche begriffen wird, bevor individuelle Plätze gespeichert werden. Die Frage wäre also, ab welchem Kenntnisstand ein neuer Platz, wie von Wiener u. a. (2004) beschrieben, einer Region zugeordnet werden kann. Ebenso von Interesse wäre, ob sich die beim Lernen genutzten Systeme auch bei späteren Planungsvorgängen wiederfinden oder ob für die Planung eigene Kategorien geschaffen werden.

Menschen scheinen Informationen über neue Wege gerichtet zu lernen. Dies zeigte sich in der vorliegenden Arbeit zum einen darin, dass Hin- und Rückwege in der Regel unterschiedlich verliefen und von verschiedenen Punkten aus gelernt wurden, zum anderen darin, dass ein und derselbe Proband für die beiden Laufrichtungen unterschiedliche Strategien anwenden und auch verschieden empfindlich auf eine Einschränkung der Sicht reagieren konnte. Informationen über die Routen scheinen demnach nicht einfach umkehrbar zu sein. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass Orte ansichtsbasiert repräsentiert und daher aus anderen Richtungen nicht wiedererkannt werden (vgl. auch Diwadkar und McNamara 1997), was für ein visuell dominiertes Routenlernen spricht (im Gegensatz zu beispielsweise in Form von Abschnittslängen und Rotationen gespeicherten "Vektor-Routen").

Welche Repräsentationsform für eine Aufgabe genutzt wird (beispielsweise grob oder fein, Übersichts- oder Routenwissen), scheint individuell verschieden zu sein (vgl. Aginsky u. a. 1997; Hartley u. a. 2003; Gramann u. a. 2005; Etchamendy und Bohbot 2007). Dies zeigte sich auch in dem hier vorgestellten Experiment. In der hindernislosen Umgebung etwa wurden zwei unterschiedliche Strategien, die Reproduktion der Trainingsrouten und die Generierung einer neuen, geradlinigen Strecke, genutzt. Dabei schienen sich besonders jene Probanden, die während des Trainings konstante Routen etabliert hatten, auch ohne die Hindernisse auf der altbewährten Route sicherer zu fühlen und versuchten, deren Verlauf zu reproduzieren. Die mentale Repräsentation der Route (und möglicherweise auch die der dabei verwendeten lokalen Landmarken) war demnach so sicher, dass die Form der Route grob reproduziert werden konnte, ohne dass zwischendurch die eigene Position durch die Hindernisse bestätigt werden musste. Dies könnte durch eine gute Repräsentation der benötigten lokalen Landmarken, deren genaue Lage während der Navigation abgeschätzt werden müsste, ebenso bewerkstelligt werden, wie durch ein festes Motorprogramm. Zumindest ein Proband zeigte eine weitere Möglichkeit: Er diskretisierte bereits auf dem Hinweg bewußt die Rotationspunkte und zählte die Sekunden zwischen einzelnen Rotationen (und vermutlich auch während derselben), eine Repräsentationsform, die im anschließenden Test ohne Hindernisse mit hoher Genauigkeit in umgekehrter Reihenfolge abgelaufen werden konnte (vgl. Abbildung 40b, Seite 59). Andere Probanden dagegen generierten neue, geradlinige Routen, die vermutlich entweder auf Wegintegration oder auf einer bewußten Neueinschätzung der Richtung beruhten, wobei letzteres durch ein mentales Ablaufen der Route ebenso zu erreichen sein mag wie mit Hilfe einer kognitiven Karte. Wie flexibel einsetzbar das erworbene Wissen nach einem gegebenen Training ist, ist unklar. Anscheinend war es zumindest nicht in allen Fällen flexibel genug, um das Generieren neuer Routen zu gestatten und diese Strategie so sicher erscheinen zu lassen, dass sie auch angewendet würde. Eine Möglichkeit, die Flexibilität zu testen, bestünde darin, die Probanden direkt aufzufordern, die jeweils andere Strategie zu verwenden. Eine solche Aufgabenstellung wurde etwa von Gramann u. a. (2005) für den Vergleich von ego- und allozentrischen Strategien verwendet. Dabei zeigte sich, dass die Fehler keineswegs größer wurden, wenn die Probanden aufgefordert wurden, eine Strategie zu verwenden, die nicht der von ihnen bevorzugten entsprach.

Dieses Beispiel zeigt, dass die genaue Formulierung der Aufgabe einen großen Einfluss auf das gewählte Verhalten der Probanden haben kann (vgl. auch beispielsweise Kozhevnikov u. a. 2006). In vielen Fällen kann Wissen aus verschiedenen Quellen ausgewählt und an die jeweilige Aufgabe ange-

passt werden. Diese mögliche Flexibilität in der Strategiewahl muss bereits bei der Formulierung der Aufgaben, aber genauso bei jeder Auswertung beachtet werden.

Zusammenfassend zeigte sich auch in dieser Arbeit, dass anscheinend mehrere mentale Repräsentationen einer Umgebung gebildet werden. Sie unterscheiden sich in ihrem Inhalt, der Genauigkeit, dem Zeitpunkt und der Dauer ihres Erwerbs und darin, bei welcher Art Aufgabe sie eingesetzt werden. Anders als von Siegel und White (1975) vorgeschlagen, scheint der Erwerb von Umgebungswissen nicht mit der Repräsentation einzelner Orte zu beginnen, die dann zu Routen verkettet und schließlich zu einer Karte vernetzt werden. Wenigstens ein grobes Übersichtswissen wird bereits während der ersten Kontakte mit einer neuen Umgebung gewonnen. Dieses Übersichtswissen wird auch durch längere Exploration der Umgebung kaum verbessert. Erst später kam es zur Etablierung von Routen, wobei ihre Bildung bereits parallel mit dem Erwerb der groben Übersicht begonnen haben könnte.

Literatur

- Aginsky u. a. 1997** AGINSKY, V. ; HARRIS, C. ; RENSINK, R. ; BEUSMANS, J.: Two Strategies For Learning a Route in a Driving Simulator. In: *Journal of Environmental Psychology* 17 (1997), S. 317–331
- Bailey und Polis 1987** BAILEY, K.H. ; POLIS, G.A.: Optimal and central-place foraging theory applied to a desert harvester ant, *Pogonomyrmez californicus*. In: *Oecologia (Berlin)* 72 (1987), S. 440–448
- Bakker u. a. 1999** BAKKER, N.H. ; WERKHOVEN, P.J. ; PASSENIER, P.O.: The effects of proprioceptive and visual feedback on geographical orientation in virtual environments. In: *Presence - Teleoperators and Virtual Environments* 8(1) (1999), S. 36–53
- Benhamou 1994** BENHAMOU, Simon: Spatial memory and searching efficiency. In: *Animal Behaviour* 47 (1994), S. 1423–1433
- Boyadjian u. a. 1999** BOYADJIAN, A. ; MARIN, L. ; DANION, F.: Veering in human locomotion: the role of the effectors. In: *Neuroscience Letters* 265(1) (1999), S. 21:24
- Breed u. a. 1987** BREED, Michael D. ; FEWELL, Jennifer H. ; MOORE, Allen J. ; WILLIAMS, Kristina R.: Graded Recruitment in a Ponerine Ant. In: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 20 (1987), S. 407–411
- Bremmer und Lappe 1999** BREMMER, F. ; LAPPE, M.: The use of optical velocities for distance discrimination and reproduction during visually simulated self motion. In: *Experimental Brain Research* 127 (1999), S. 33–42
- Collett und Collett 2000** COLLETT, Matthew ; COLLETT, Thomas S.: How do Insects Use Path Integration for Their Navigation? In: *Biological Cybernetics* 83 (2000), S. 245–259
- Cornell und Heth 2003** CORNELL, Edward H. ; HETH, C. D.: *Remembering where: Advances in understanding spatial memory*. Kap. Memories of Travel: Dead Reckoning Within the Cognitive Map, S. Draft: 1–46, Lawrence Erlbaum Associates., 2003. – URL http://web.psych.ualberta.ca/ecornell/Memories_of_Travel.pdf
- Cornell u. a. 2003** CORNELL, Edward H. ; SORENSON, Autumn ; MIO, Teresa: Human Sense of Direction and Way-finding. In: *Annals of the Association of American Geographers* 93 (2003), S. 399 – 425
- Cornell u. a. 1994** CORNELL, E.H. ; HETH, C.D. ; ALBERTS, D.M.: Place recognition and way finding by children and adults. In: *Memory and Cognition* 22(6) (1994), S. 633–643
- Cornell u. a. 1996** CORNELL, E.H. ; HETH, C.D. ; KNEUBUHLER, Y. ; SEHGAL, S.: Serial Position Effects in Children's Route Reversal Errors: Implications for Police Search Operations. In: *Applied Cognitive Psychology* 10(4) (1996), S. 301–326
- Dickstein u. a. 2005** DICKSTEIN, R. ; UFAZ, S. ; DUNSKY, A. ; NADEAU, S. ; ABULAFFIO, N.: Speed-dependent deviations from a straight-ahead path during forward locomotion in healthy individuals. In: *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 84(5) (2005), S. 330–337
- Diwadkar und McNamara 1997** DIWADKAR, V.A. ; MCNAMARA, T.P.: Viewpoint Dependence in Scene Recognition. In: *Psychological Science* 8(4) (1997), S. 302–307
- Dyer 2002** DYER, Fred C.: The Biology of the Dance Language. In: *Annu. Rev. Entomol.* 47 (2002), S. 917–949
- Ehmer 1999** EHMER, Birgit: Orientation in the Ant *Paraponera clavata*. In: *Journal of Insect Behavior* 12(5) (1999), S. 711–722
- Engelmann und Pessoa 2007** ENGELMANN, J.B. ; PESSOA, L.: Motivation Sharpens Exogenous Spatial Attention. In: *Emotion* 7(3) (2007), S. 668–674
- Etchamendy und Bohbot 2007** ETCHAMENDY, N. ; BOHBOT, V.D.: Spontaneous Navigational Strategies and Performance in the Virtual Town. In: *Hippocampus* 17 (2007), S. 595–599
- Etienne u. a. 1985** ETIENNE, A. S. ; TERONI, E. ; MAURER, R. ; PORTENIER, V. ; SAUCY, F.: Short-distance homing in a small mammal: the role of exteroceptive cues and path integration. In: *Cellular and Molecular Life Sciences (CMLS)* 41(1) (1985), S. 122–125
- Etienne u. a. 1988** ETIENNE, Ariane S. ; MAURER, Roland ; SAUCY, Francis: Limitations in the Assessment of Path Dependent Information. In: *Behaviour* 106(1-2) (1988), S. 81–110
- Fisher 1993** FISHER, N. I.: *Statistical analysis of circular data*. University of Cambridge Press, 1993
- Foo u. a. 2005** FOO, P. ; WARREN, W.H. ; DUCHON, A. ; TARR, M.J.: Do Humans Integrate Routes Into a Cognitive Map? Map- Versus Landmark-Based Navigation of Novel Shortcuts. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 31(2) (2005), S. 195–215
- Franz und Mallot 2000** FRANZ, M.O. ; MALLOT, H.A.: Biomimetic robot navigation. In: *Robotics and Autonomous Systems* 38 (2000), S. 133–153

- Frisch 1965** FRISCH, K. v.: *Tanzsprache und Orientierung der Bienen (engl. version: The Dance Language and Orientation in Bees(1967))*. Springer, 1965
- Fry und Wehner 2005** FRY, S. N. ; WEHNER, R.: Look and turn: landmark-based goal navigation in honey bees. In: *The Journal of Experimental Biology* 208 (2005), S. 3945–3955
- Gallistel und Cramer 1996** GALLISTEL, C.R. ; CRAMER, A.E.: Computations on metric maps in mammals: getting oriented and choosing a multi-destination route. In: *The Journal of Experimental Biology* 199 (1996), S. 211–217
- Golledge u. a. 1992** GOLLEDGE, Reginald G. ; GALE, Nathan P. ; JAMES, W. ; DOHERTY, Sally: Spatial Knowledge Acquisition by Children: Route Learning and Relational Distances. In: *Annals of the Association of American Geographers* 82 (1992), S. 223–244
- Gramann u. a. 2005** GRAMANN, K. ; MUELLER, H.J. ; EICK, E.M. ; SCHOENEBECK, B.: Evidence of Separable Spatial Representations in a Virtual Navigation Task. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 31(6) (2005), S. 1199–1223
- Hafting u. a. 2005** HAFTING, T. ; FYHN, M. ; MOLDEN, S. ; MOSER, M.-B. ; MOSER, E.I.: Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. In: *nature* 436 (2005), S. 801–806
- Harlen und Crick 2003** HARLEN, W. ; CRICK, R.D.: Testing and Motivation for Learning. In: *Assessment in Education* 10(2) (2003), S. 169–207
- Hartley u. a. 2003** HARTLEY, Tom ; MAGUIRE, Eleanor A. ; SPIERS, Hugo J. ; BURGESS, Neil: The Well-Worn Route and the Path Less Traveled: Distinct Neural Bases of Route Following and Wayfinding in Humans. In: *Neuron* 37 (2003), S. 877–888
- Hegarty u. a. 2002** HEGARTY, M. ; RICHARDSON, E.A. ; MONTELLO, K. ; SUBBIAH, I.: Development of a self-report measure of environmental spatial ability. In: *Intelligence* 30 (2002), S. 425–447
- Hoffmann 1983** HOFFMANN, Gerhard: The random elements in the systematic search behavior of the desert isopod *Hemilepistus reaumuri*. In: *Behav. Ecol. Sociobiol.* 13 (1983), S. 81–92
- Holding und Holding 1989** HOLDING, C.S. ; HOLDING, D.H.: Acquisition of Route Network Knowledge by Males and Females. In: *The Journal of General Psychology* 116 (1989), S. 29–41
- Horev u. a. 2007** HOREV, G. ; BENJAMINI, Y. ; SAKOV, A. ; GOLANI, I.: Estimating Wall Guidance and Attraction in Mouse Free Locomotor Behavior. In: *Genes, Brain and Behavior* 6 (2007), S. 30–41
- Iaria u. a. 2003** IARIA, G. ; PETRIDES, M. ; DAGHER, A. ; PIKE, B. ; BOHBOT, V.D.: Cognitive Strategies Dependent on the Hippocampus and Caudate Nucleus in Human Navigation: Variability and Change with Practice. In: *The Journal of Neuroscience* 23(13) (2003), S. 5945–5952
- Ishikawa und Montello 2006** ISHIKAWA, T. ; MONTELLO, D.R.: Spatial knowledge acquisition from direct experience in the environment: Individual differences in the development of metric knowledge and the integration of separately learned places. In: *Cognitive Psychology* 52 (2006), S. 93–129
- Jeffery und Burgess 2006** JEFFERY, K.J. ; BURGESS, N.: A metric for the cognitive map: found at last? In: *TRENDS in Cognitive Sciences* 10(1) (2006), S. 1–3
- Kacelnik 1984** KACELNIK, A.: Central Place Foraging in Starlings (*Sturnus vulgaris*). I. Patch Residence Time. In: *Journal of Animal Ecology* 53 (1984), S. 283–299
- Kallie u. a. 2007** KALLIE, C.S. ; SCHRATER, P.R. ; LEGGE, G.E.: Variability in stepping direction explains the veering behavior of blind walkers. In: *Journal of Experimental Psychology / Human Perception and Performance* 33(1) (2007), S. 183–200
- Kearns u. a. 2002** KEARNS, M.J. ; WARREN, W.H. ; DUCHON, A.P. ; TARR, M.J.: Path integration from optic flow and body senses in a homing task. In: *Perception* 31 (2002), S. 349–374
- Kirschen u. a. 2000** KIRSCHEN, M.P. ; KAHANA, M.J. ; SEKULER, R. ; BURACK, B.: Optic flow helps humans learn to navigate through synthetic environments. In: *Perception* 29(7) (2000), S. 801–818
- Klatzky u. a. 1999** KLATZKY, R.L. ; BEAL, A.C. ; LOOMIS, J.M. ; GOLLEDGE, R.G. ; PHILBECK, J.W.: Human navigation ability: Tests of the encoding-error model of path integration. In: *Spatial Cognition and Computation* 1 (1999), S. 31–65
- Klatzky u. a. 1990** KLATZKY, R.L. ; LOOMIS, J.M. ; GOLLEDGE, R.G. ; CICINELLI, J.G. ; DOHERTY, S. ; PELLEGRINO, J.W.: Acquisition of route and survey knowledge in the absence of vision. In: *Journal of Motor Behavior* 22(1) (1990), S. 19–43
- Kohler und Wehner 2005** KOHLER, M. ; WEHNER, R.: Idiosyncratic route-based memories in desert ants, *Melophorus bagoti*: How do they interact with path-integration vectors? In: *Neurobiol. Learn. Mem.* 83 (2005), S. 1–12

- Kozhevnikov u. a. 2006** KOZHEVNIKOV, M. ; MOTES, M.A. ; RASCH, B. ; BLAJENKOVA, O.: Perspective-Taking vs. Mental Rotation Transformations and How They Predict Spatial Navigation Performance. In: *Applied Cognitive Psychology* 20 (2006), S. 397–417
- Long und Hilpert 2007** LONG, Wei ; HILPERT, Markus: Analytical solutions for bacterial energy taxis (chemotaxis): Traveling bacterial bands. In: *Advances in Water Resources* 30(11) (2007), S. 2262–2270
- Loomis u. a. 1993** LOOMIS, J.M. ; KLATZKY, R.L. ; GOLLEDGE, R.G. ; CINCINELLI, J.G. ; PELLEGRINO, J.W. ; FRY, P.A.: Nonvisual Navigation by Blind and Sighted: Assessment of Path Integration Ability. In: *Journal of Experimental Psychology: General* 122 (1993), S. 73–91
- Mallot Sommersemester 2006** MALLOT, H.A.: Messen und Auswerten in der Biologie - Skript, Sommersemester 2006
- Mallot Wintersemester 2004** MALLOT, H.A.: Kognitive Neurobiologie - Skript, Wintersemester 2004
- Mallot und Franz 1999** MALLOT, H.A. ; FRANZ, M.O.: Biological Approaches to Spatial Representation - A Survey. In: DEAN, T. (Hrsg.): *Proc. of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, URL file:/home/kbasten/DOCS/papers/MallotFranz1999.pdf, 1999
- Muehl und Sholl 2004** MUEHL, K.A. ; SHOLL, M.J.: The acquisition of vector knowledge and its relation to self-rated direction sense. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 30(1) (2004), S. 129–141
- Mueller und Wehner 1988** MUELLER, M. ; WEHNER, R.: Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Neurobiology* 85 (1988), S. 5287–5290
- Müller und Wehner 1994** MÜLLER, M. ; WEHNER, R.: The hidden spiral: systematic search and path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*. In: *J. Comparative Physiology A* 175 (1994), S. 525–530. – URL www.springerlink.com/media/a8612r45f14yunfc3gdh/contributions/1/2/1/2/121217t6pw686314.pdf
- Needleman und Wunsch 1970** NEEDLEMAN, S.B. ; WUNSCH, C.D.: A General Method Applicable to the Search for Similarities in the Amino Acid Sequence of Two Proteins. In: *J. Mol. Biol.* 48 (1970), S. 443–453
- Page 1963** PAGE, E.: Ordered Hypotheses for Multiple Treatments: A Significance Test for Linear Ranks. In: *Journal of the American Statistical Association* 58 (301) (1963), S. 216 – 230. – URL <http://www.jstor.org/view/01621459/di985872/98p09875/0>
- Paola u. a. 2004** PAOLA, Vieri D. ; MARIJUÁN, Pedro C. ; LAHOZ-BELTRA, Rafael: Learning and evolution in bacterial taxis: an operational amplifier circuit modeling the computational dynamics of the prokaryotic ‘two component system’ protein network. In: *Biosystems* 74 (2004), S. 29–49
- Passini 1984** PASSINI, R.: Spatial Representations, a Wayfinding Perspective. In: *Journal of Environmental Psychology* 4 (1984), S. 153–164
- Peruch u. a. 1997** PERUCH, P. ; MAY, M. ; WARTENBERG, F.: Homing in virtual environments: effects of field of view and path layout. In: *Perception* 26 (3) (1997), S. 301–311. – URL <http://www2.hsu-hh.de/psyifk/mm/downloads/perception1997.pdf>
- Poldrack u. a. 2001** POLDRACK, R.A. ; CLARK, J. ; PARE-BLAGOEV, E.J. ; SHOHAMY, D. ; CRESO, Moyano J. ; MYERS, C. ; GLUCK, M.A.: Interactive memory systems in the human brain. In: *nature* 414 (2001), S. 546–550
- Riecke u. a. 2002** RIECKE, Bernhard E. ; VEEN, Henricus A. H. C. van ; BÜLT-HOFF, Heinrich H.: Visual Homing Is Possible Without Landmarks: A Path Integration Study in Virtual Reality. In: *Presence* 11 (5) (2002), S. 443–473. – URL <http://mitpress.mit.edu/catalog/item/default.asp?sid=7FFDB92B-EF42-408A-9F41-504F210447B3anddtype=6andtid=9224>
- Ruddle u. a. 1998** RUDDLE, R.A. ; PAYNE, S.J. ; JONES, D.M.: Navigating Large-Scale “Desk-Top” Virtual Buildings: Effects of Orientation Aids and Familiarity. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7, 179–192. 7(2) (1998), S. 179–192
- Sachs 1968** SACHS, Lothar: *Angewandte Statistik*. 10. Springer, 1968
- Sholl 1996** SHOLL, MJ: *The Construction of Cognitive Maps*. Kap. From Visual Information to Cognitive Maps, S. 157:186, Kluwer Academic Publishers, 1996
- Siegel und White 1975** SIEGEL, A.W. ; WHITE, S.H.: The Development of Spatial Representations of Large-Scale environments. In: *Advances in Child Development and Behavior* 10 (1975), S. 9–55
- Smallwood u. a. 2007** SMALLWOOD, J. ; FISHMAN, D.J. ; SCHOOLER, J.W.: Counting the cost of an absent mind: Mind wandering as underrecognized influence on educational performance. In: *Psychometric Bulletin and Review* 14(2) (2007), S. 230–236
- Snowden u. a. 1998** SNOWDEN, R.J. ; STIMPSON, N. ; RUDDLE, R.A.: Speed perception fogs up as visibility drops. In: *nature* 392 (1998), S. 450

- Stahel 1996** STAHEL, Werner: *Statistische Datenanalyse - eine Einführung für Naturwissenschaftler*. 2. vieweg, 1996
- Steck und Mallot 2000** STECK, S. D. ; MALLOT, H. A.: The role of global and local landmarks in virtual environment navigation. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 9(1) (2000), S. 69–83
- Stone und Thompson 1992** STONE, L.S. ; THOMPSON, P.: Human Speed Perception is Contrast Dependent. In: *Vision Research* 32 (8) (1992), S. 1535–2549
- Taube und Burton 1995** TAUBE, J. S. ; BURTON, H. L.: Head direction cell activity monitored in a novel environment and during a cue conflict situation. In: *Journal of Neurophysiology* 74(5) (1995), S. 1953–1971
- Thorndyke und Hayes-Roth 1982** THORNDYKE, P.W. ; HAYES-ROTH, B.: Differences in Spatial Knowledge Acquired from Maps and Navigation. In: *Cognitive Psychology* 14 (1982), S. 560–589
- Trullier u. a. 1997** TRULLIER, O. ; WIENER, S.I. ; BERTHOZ, A. ; MEYER, J.-A.: Biologically based artificial navigation systems: review and prospects. In: *Progress in Neurobiology* 51 (1997), Nr. 5, S. 483–544
- Uetake 1992** UETAKE, T.: Can we really walk straight? In: *American Journal of Physical Anthropology* 89(1) (1992), S. 19–27
- Wallraff 1980** WALLRAFF, Hans G.: Does pigeon homing depend on stimuli perceived during displacement? I. Experiments in Germany. In: *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 139(3) (1980), S. 193–01
- Wallraff u. a. 1980** WALLRAFF, Hans G. ; FOA, Augusto ; IOALE, Paolo: Does Pigeon Homing Depend on Stimuli Perceived During Displacement? In: *J. Comp. Physiol.* 139 (1980), S. 203–208
- Wehner 2003** WEHNER, R.: Desert ant navigation: How miniature brains solve complex tasks. In: *J. Comp. Physiol. A* 189 (2003), S. 579–588
- Wehner u. a. 2002** WEHNER, R. ; K., Gallizim ; FREI, C. ; VESELY, M.: Calibration processes in desert ant navigation: vector courses and systematic search. In: *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 188 (2002), S. 683–693
- Weissburg u. a. 1998** WEISSBURG, M. J. ; DOALL, M. H. ; YEN, J.: Following the invisible trail: kinematic analysis of mate-tracking in the copepod *Temora longicornis*. In: *Philosophical Transactions of The Royal Society - Biological Sciences* 353(1369) (1998), S. 701–712
- Wiener und Mallot 2006** WIENER, J. ; MALLOT, H.A.: Path Complexity Does Not Impair Visual Path Integration. In: *Spatial Cognition and Computation* 6(4) (2006), S. 333–346
- Wiener und Mallot 2003** WIENER, Jan M. ; MALLOT, Hanspeter A.: 'Fine-to-Coarse' Route Planning and Navigation in Regionalized Environments. In: *Spatial Cognition and Computation* 3(4) (2003), S. 331–358
- Wiener u. a. 2004** WIENER, Jan M. ; SCHNEE, Alexander ; MALLOT, Hanspeter A.: Use and interaction of navigation strategies in regionalized environment s. In: *Journal of Environmental Psychology* 24 (2004), S. 475–493
- Wiltshcko und Wiltshcko 1999** WILTSHCKO, Roswitha ; WILTSHCKO, Wolfgang: Das Orientierungssystem der Vögel - II. Heimfinden und Navigation. In: *Journal of Ornithology* 140(2) (1999), S. 129–164

A Probandencodierung

Jedem Probanden wurden eine Farbe und eine Markerform zugeordnet, die, wenn nicht anders angegeben, überall in der vorliegenden Arbeit für diesen Probanden verwendet wurde.

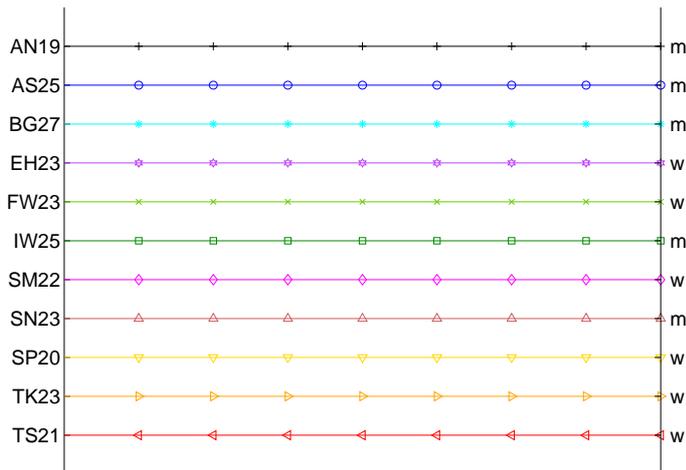


Abbildung 60: Linienfarbe und verwendeter Markertyp für die einzelnen Probanden. Die Bezeichnung steht jeweils auf der rechten Seite, das Geschlecht (m/w) auf der linken.

B Fragen im Vorfeld

B.1 Einverständniserklärung

Sie haben sich bereit erklärt, an einem Experiment zur Raumorientierung beim Menschen teilzunehmen. Hierbei wird die Methode der virtuellen Realität verwendet. Die visuellen Stimuli werden über einen Bildschirm eingespielt.

Bei einigen Probanden kann es im Verlauf des Experimentes zu Übelkeit und/oder Schwindel kommen.

Das Experiment kann zu jedem Zeitpunkt abgebrochen werden.

Name:

Datum:

Unterschrift:

B.2 Fragebogen

Name:
Telefon:
Email:

1. Alter:
 2. Beruf:
 3. Händigkeit:
 4. Haben sie Sehfehler? (Kurz-, Weit-, Stabsichtigkeit ...)
Wieviele Dioptrien haben sie?
LINKS: ; RECHTS:
-

5. Wie gut ist ihr Orientierungssinn?
SCHLECHT 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 SEHR GUT

6. Wieviel Erfahrung haben sie mit Computerspielen?
WENIG 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 VIEL

7. Was für Spiele?

8. Wieviel Erfahrung haben sie mit dem Joystick?
WENIG 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 VIEL

9. Waren sie schon öfter Versuchsperson bei Experimenten?
SELTEN 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 OFT

C Probandeninformationen

C.1 Training

Aufgabe

- Finde den Feeder (**roter Ball**) und von dort zurück zum Nest (**blauer Ball**)
- Wiederhole diesen Vorgang (**Nest-Feeder-Nest-...**)

Umgebung

- Bewegung vorwärts und rückwärts mit linkem Hebel, Drehung mit rechtem
- Es gibt vier bunte Landmarken an den Seiten der Umgebung:
Vom Nest aus liegt der Feeder im Segment zwischen der **grünen** und der **roten** Säule.
Vom Feeder aus liegt das Nest im Segment zwischen der **blauen** und der **gelben** Säule.
- Nest und Feeder sind nur aus geringer Entfernung sichtbar

Dauer

- 45 Minuten mit 5 Minuten Pause nach ca. 20 Minuten.
- Die Pause darf nur nach einer erfolgreichen Rückkehr zum Nest beginnen.

C.2 Pointen

- Beachte den Bildschirmtext!
- Drehe dich in die Richtung des angegebenen Zieles (**Nest** oder **Feeder**).
- Wenn du meinst, dass die Richtung korrekt ist, drücke Taste "2"
- Wiederhole diesen Vorgang.

Umgebung

- Es sind nur Rotationen (rechter Hebel) erlaubt.
- Es gibt vier bunte Landmarken an den Seiten der Umgebung:
Vom Nest aus liegt der Feeder im Segment zwischen der **grünen** und der **roten** Säule.
Vom Feeder aus liegt das Nest im Segment zwischen der **blauen** und der **gelben** Säule.
- Nest und Feeder sind nur aus geringer Entfernung sichtbar.

Dauer

- Maximal 28 Wiederholungen.

C.3 Homing - Pointing mit anschließendem Heimfinden

- Beachte den Bildschirmtext!
- Drehe dich in die Richtung des angegebenen Zieles (Nest oder Feeder).
- Wenn du meinst, dass die Richtung korrekt ist, drücke Taste "2"
- Laufe anschließend zurück zum Nest
- Wiederhole diesen Vorgang.

Umgebung

- Während des Pointens sind nur Rotationen (rechter Hebel) erlaubt.
- Anschließend sind auch Translationen (linker Hebel) möglich.
- Es gibt vier bunte Landmarken an den Seiten der Umgebung:
Vom Nest aus liegt der Feeder im Segment zwischen der grünen und der roten Säule.
Vom Feeder aus liegt das Nest im Segment zwischen der blauen und der gelben Säule.
- Nest und Feeder sind nur aus geringer Entfernung sichtbar.

Dauer

- 8 Wiederholungen.

C.4 Nebel

- Finde den Feeder (roter Ball) und von dort zurück zum Nest (blauer Ball)
- Wiederhole diesen Vorgang (Nest-Feeder-Nest)

Umgebung

- Bewegung vorwärts und rückwärts mit linkem Hebel, Drehung mit rechtem
- Nest und Feeder sind nur aus geringer Entfernung sichtbar

Dauer

- Ca. 20 Minuten.
- Beendet wird nach einer erfolgreichen Rückkehr zum Nest.

C.5 Navigation ohne Landmarken

- Laufe zum **Feeder**.
- Die Landmarken verschwinden nach Erreichen des **Feeders**.
- Laufe zurück zum **Nest**.
- Wenn du meinst, dass die Position korrekt ist, drücke Taste "2".

Dauer

- Drei Durchgänge.

D Zusätzliche Abbildungen

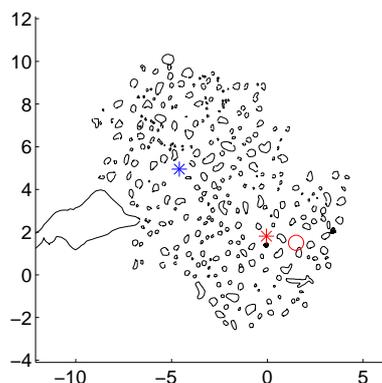


Abbildung 61: Karte der Umgebung mit eingezeichneten Zielpositionen. Die korrekten Ziele sind als Asterisken dargestellt (Nest blau, Feeder rot), das falsche als Kreis (Feeder bei AS25, FW23, SM22)

Nebel: Falsch eingetragene Zielposition

D.1 Korrelationen

Zusammenhang zwischen verstrichener Zeit und Anzahl der Messpunkte

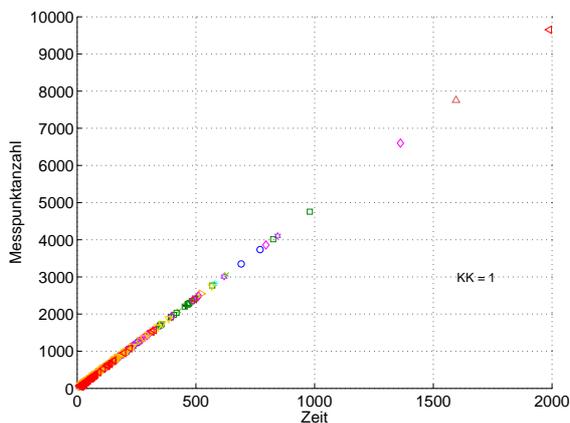


Abbildung 62: Vergleich von verstrichener Zeit und Anzahl der aufgenommenen Messwerte. Der lineare Zusammenhang läßt darauf schließen, dass es nur wenig Abweichungen von der Abtastrate von 5Hz gibt.

Zusammenhang zwischen den einzelnen im Pointingversuch untersuchten Parametern

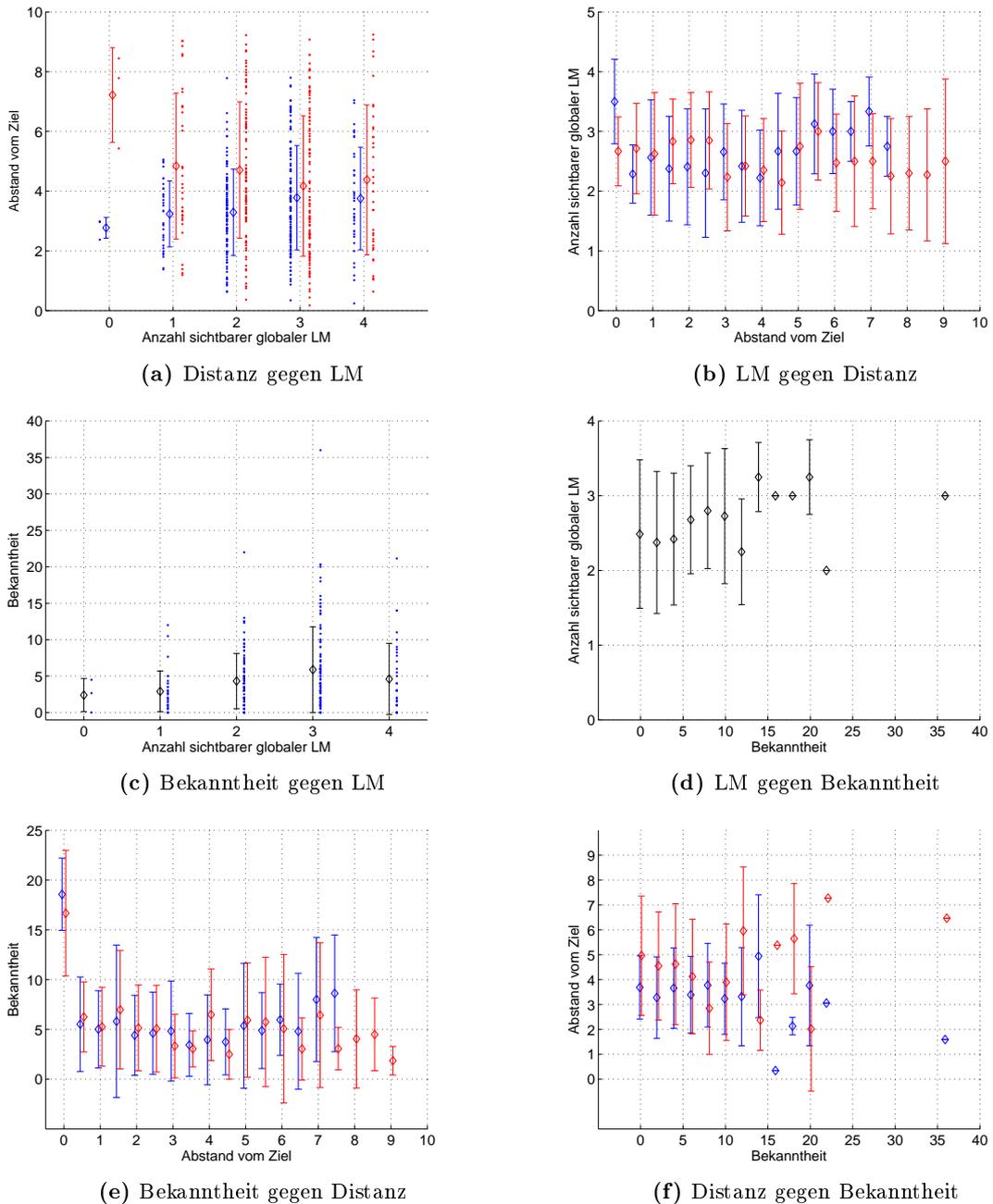


Abbildung 63: Zusammenhang der beim Pointingversuch untersuchten Parameter. **a:** Distanz gegen Anzahl sichtbarer globaler Landmarken (LM). **b:** Distanz gegen Anzahl sichtbarer globaler Landmarken. **c:** Bekanntheit gegen Anzahl sichtbarer globaler Landmarken. **d:** Anzahl sichtbarer globaler Landmarken gegen Bekanntheit. **e:** Bekanntheit gegen Distanz vom Ziel. **f:** Distanz vom Ziel gegen Bekanntheit. In allen Abbildungen sind die Werte, die auf das Nest beziehen, in blau dargestellt, diejenigen, die sich auf den Feeder beziehen, in rot. Werte, die für beide Richtungen identisch sind, sind schwarz dargestellt.

D.2 Trajektorien

D.2.1 Trainingstrajektorien

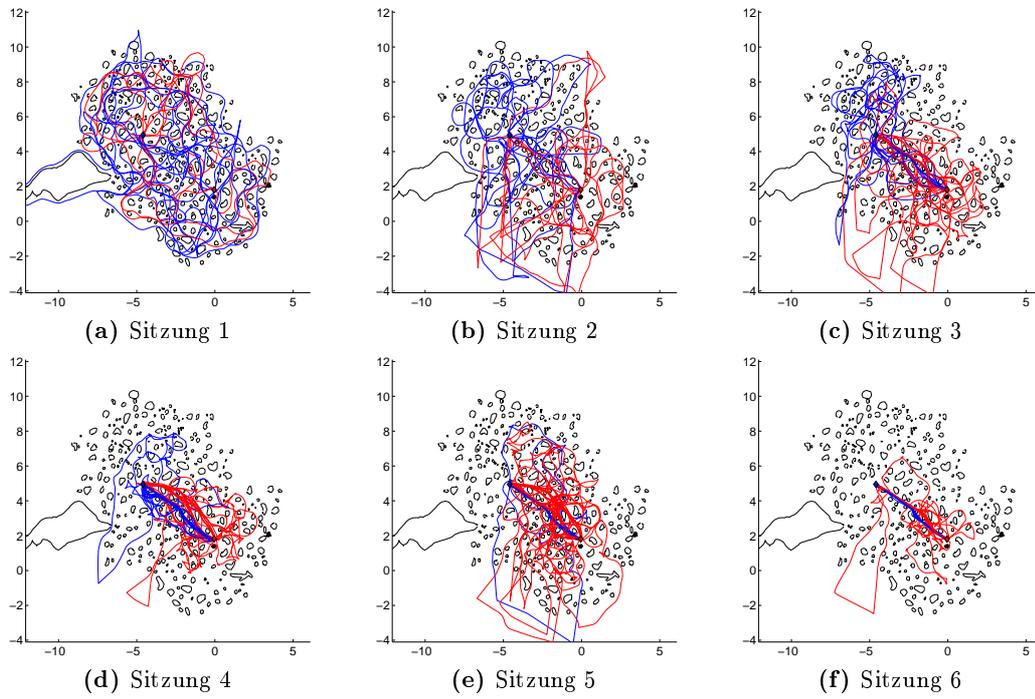


Abbildung 64: Sitzungen von AN19. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

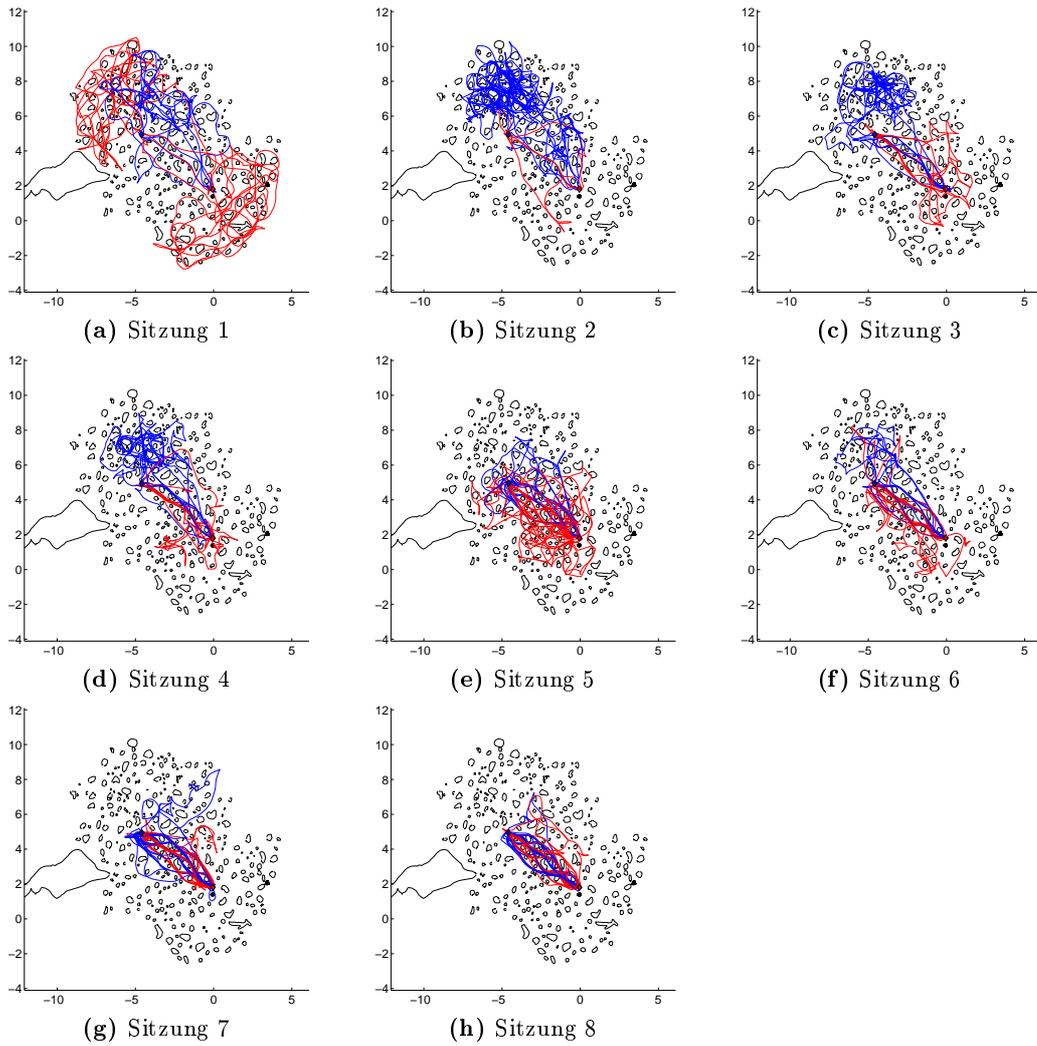


Abbildung 65: Sitzungen von AS25. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

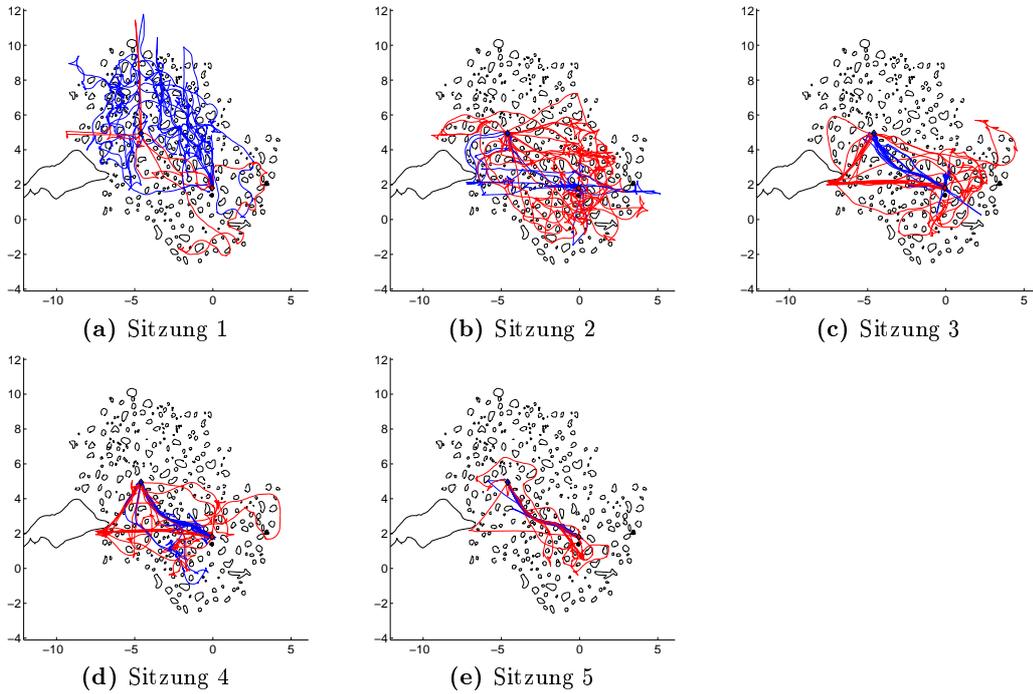


Abbildung 66: Sitzungen von BG27. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

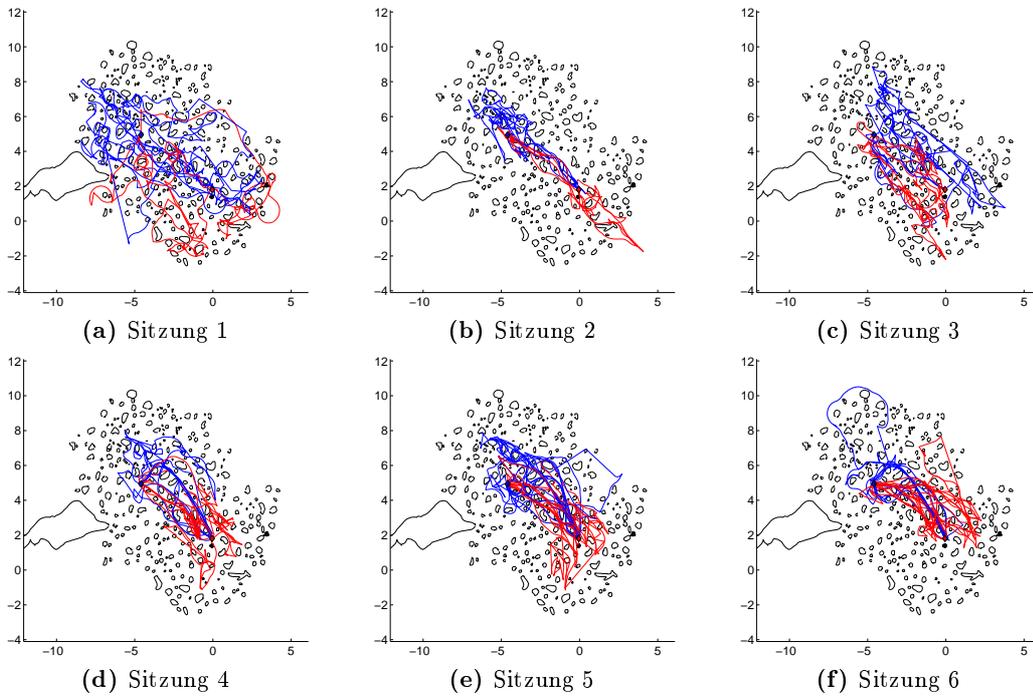


Abbildung 67: Sitzungen von EH23. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

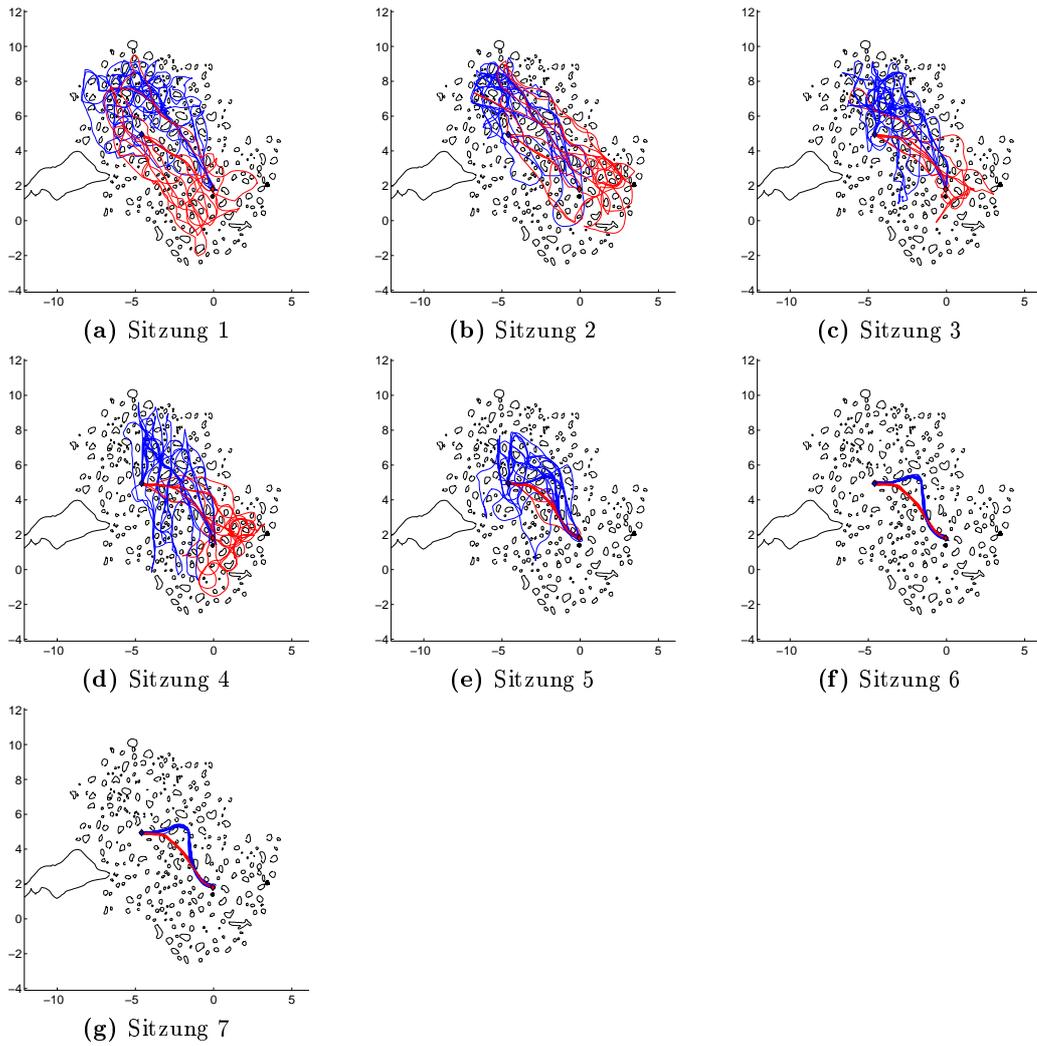


Abbildung 68: Sitzungen von FW23. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

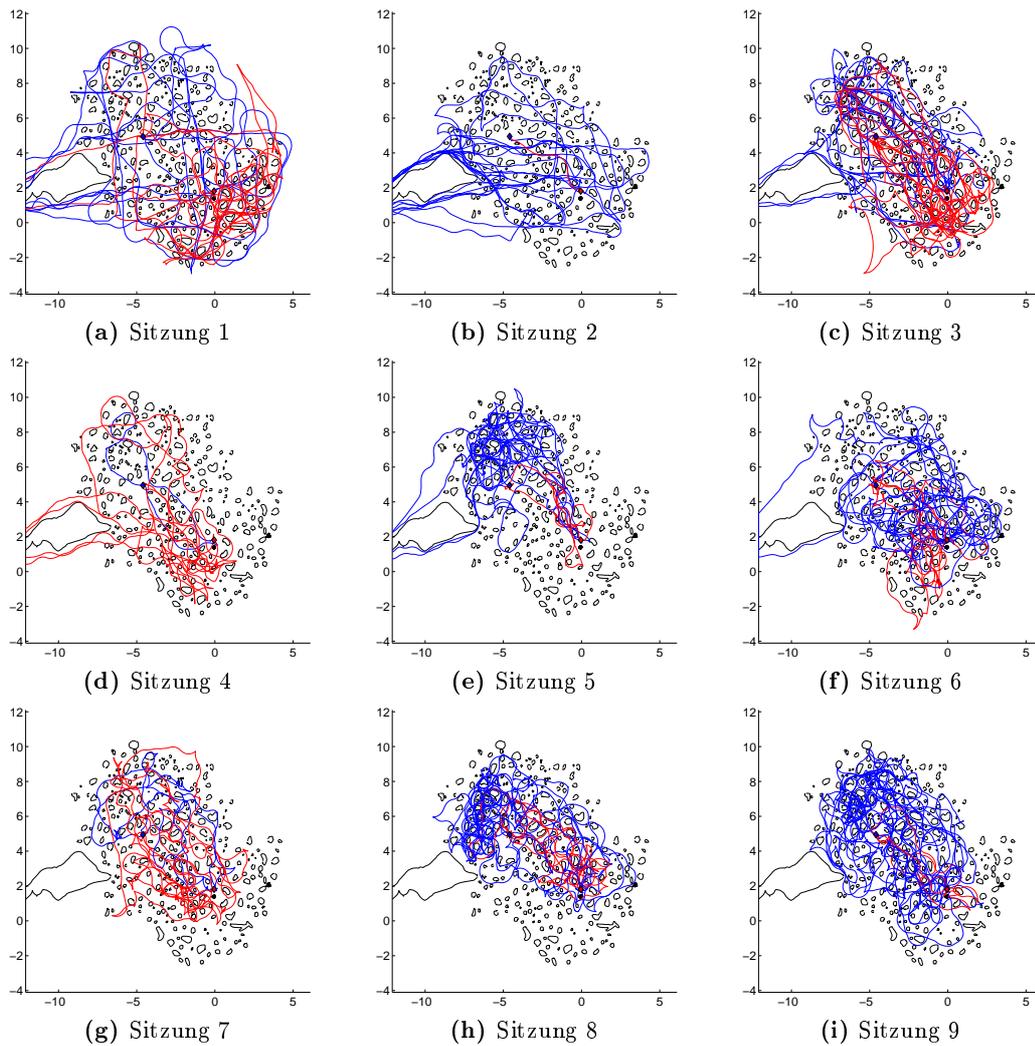


Abbildung 69: Sitzungen von IW25. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

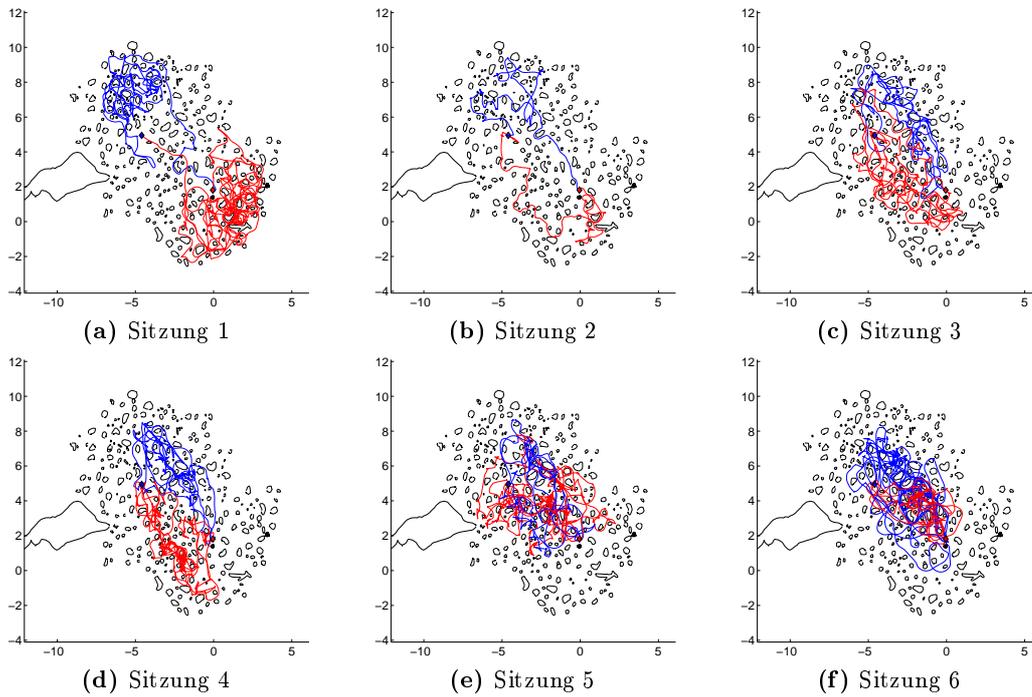


Abbildung 70: Sitzungen von SM22. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

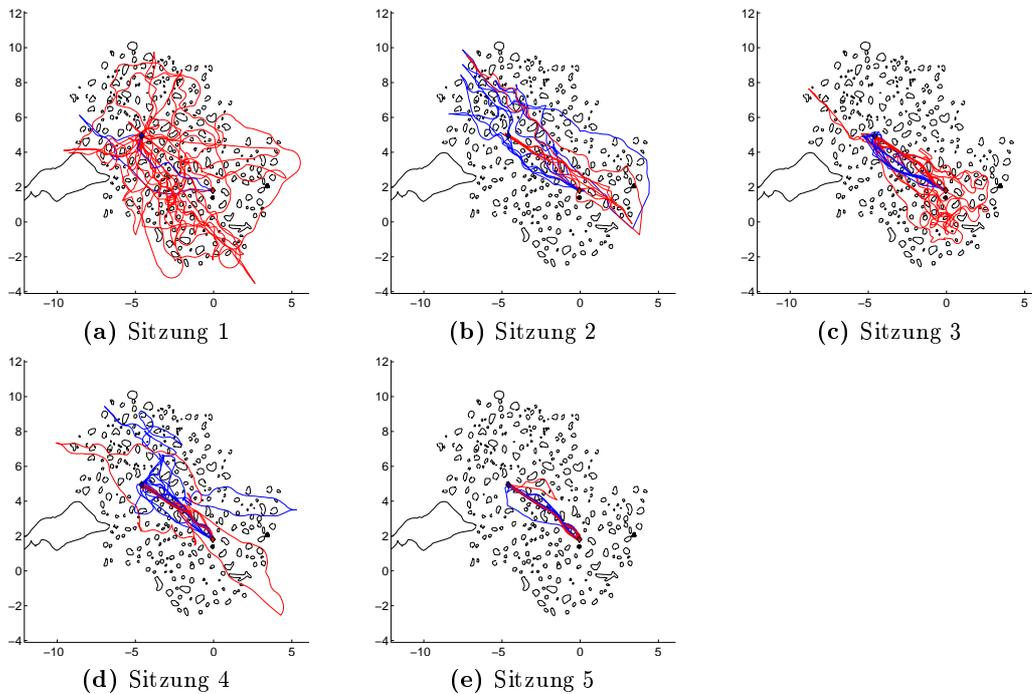


Abbildung 71: Sitzungen von SN23. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

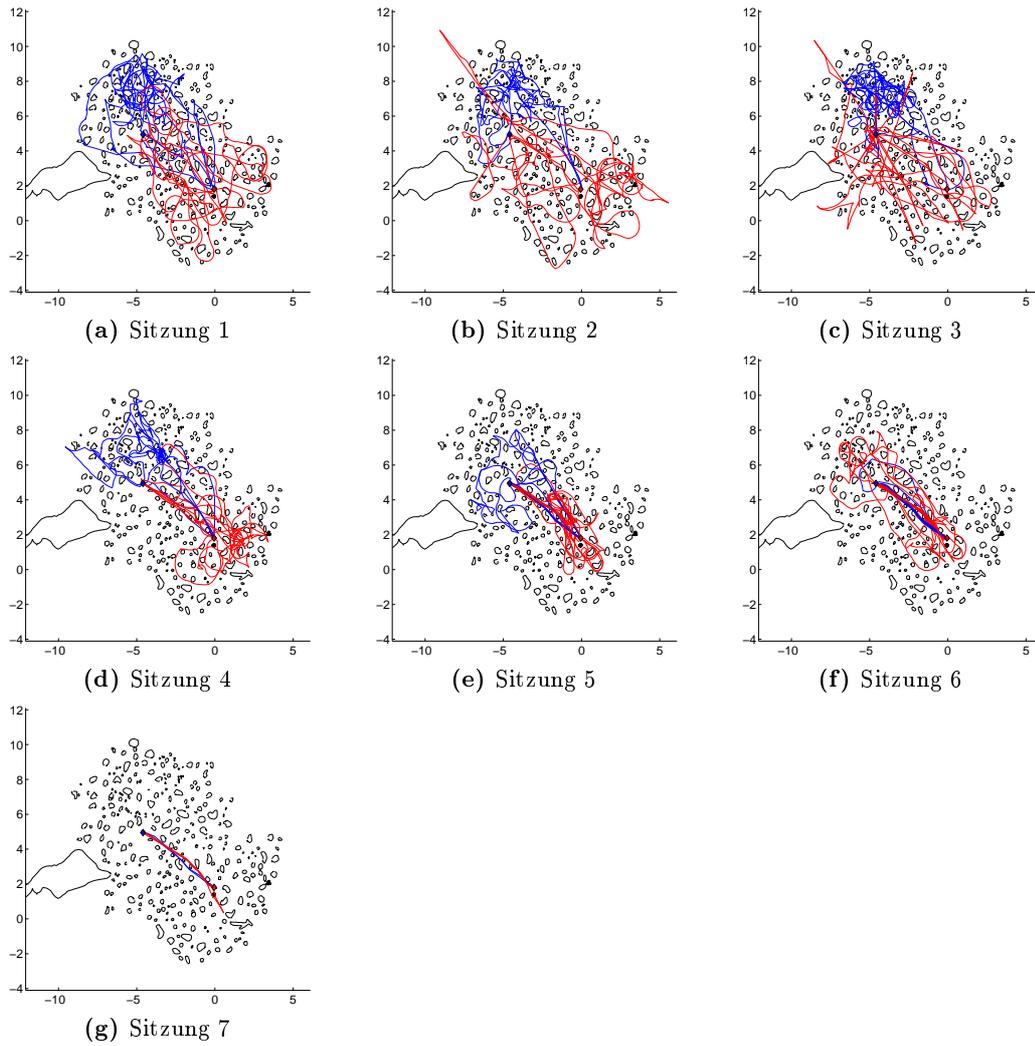


Abbildung 72: Sitzungen von SP20. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

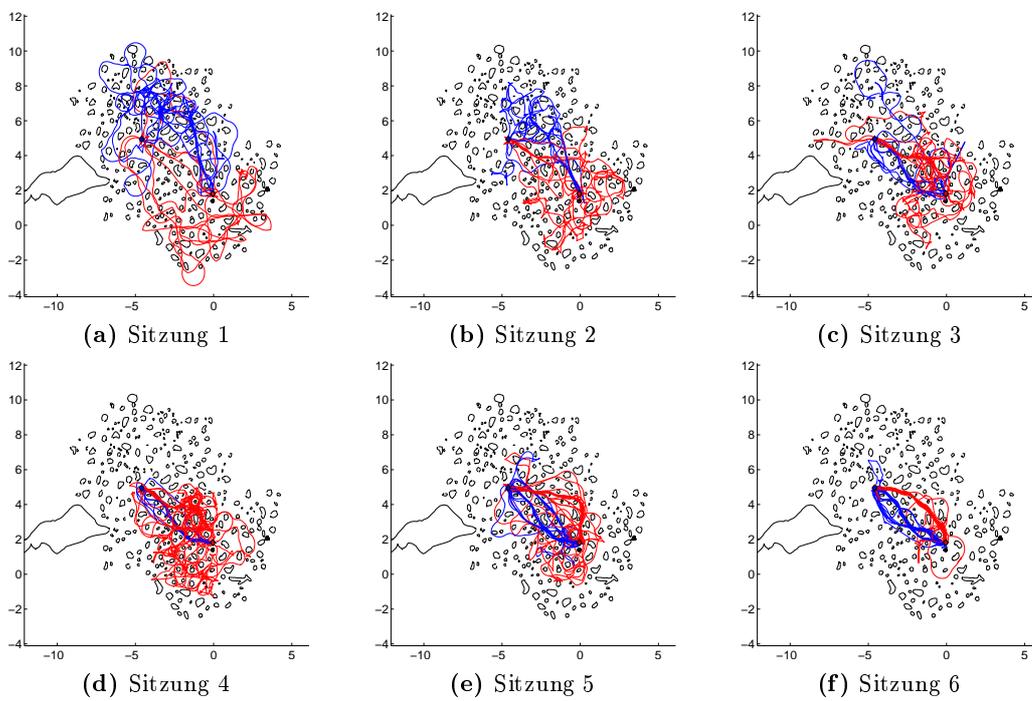


Abbildung 73: Sitzungen von TK23. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

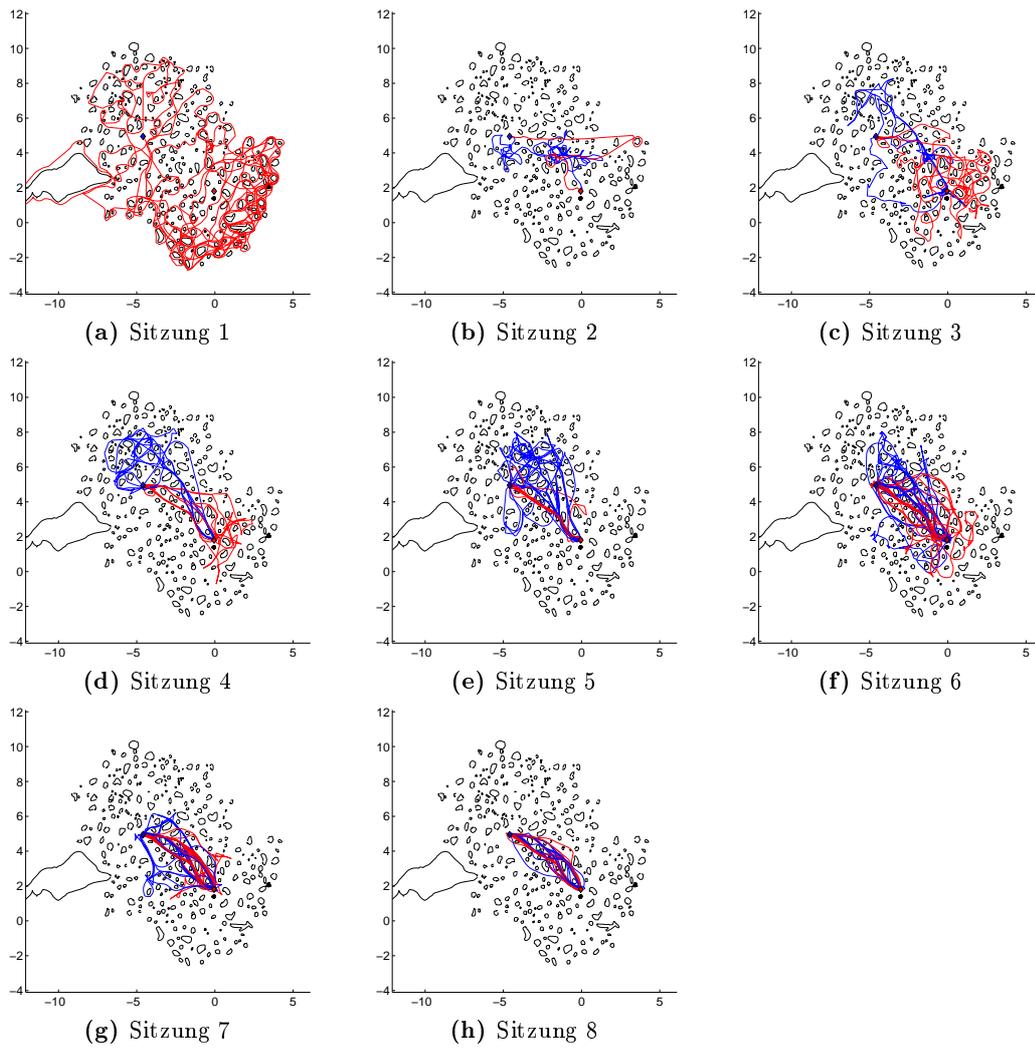


Abbildung 74: Sitzungen von TS21. Pfade zum Nest in blau, zum Feeder in rot.

D.2.2 Trajektorien im Nebel

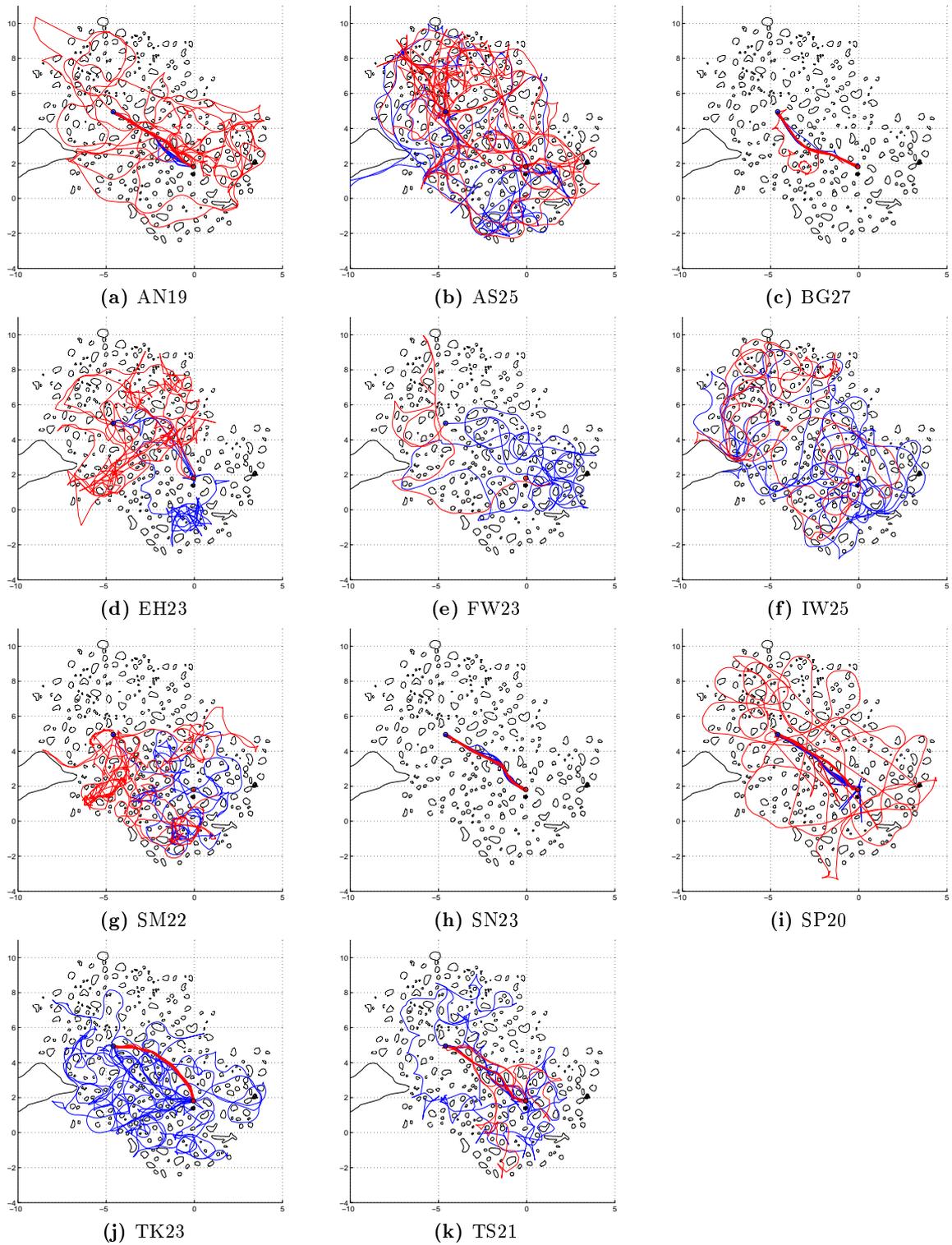


Abbildung 75: Trajektorien der einzelnen Probanden im Nebel. Pfade zum Nest blau, zum Feeder rot dargestellt.

D.2.3 Trajektorien ohne lokale Landmarken

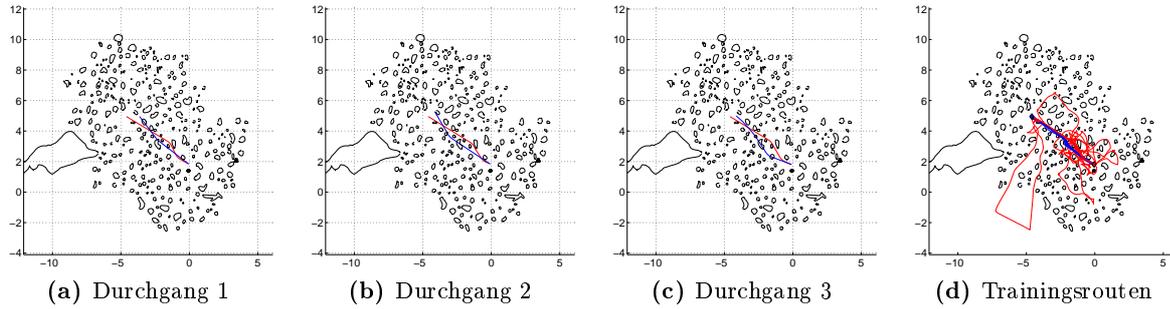


Abbildung 76: AN19. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

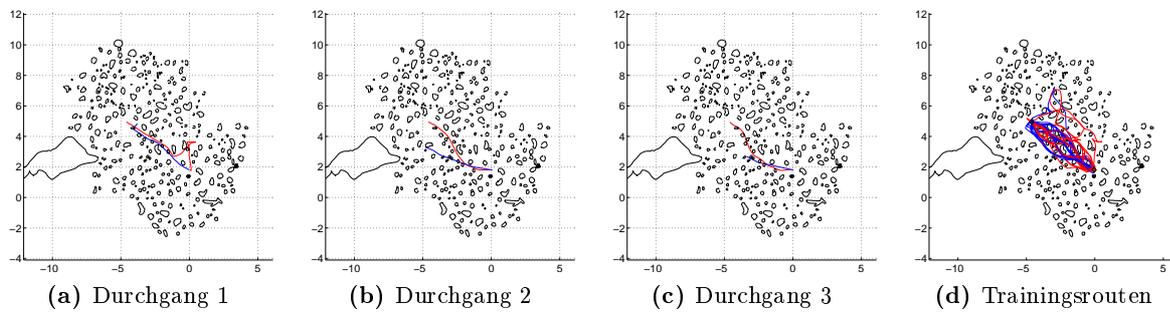


Abbildung 77: AS25. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

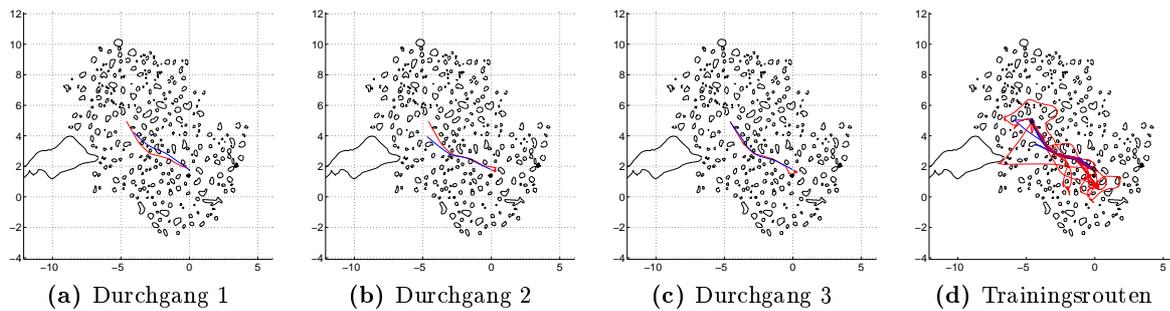


Abbildung 78: BG27. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

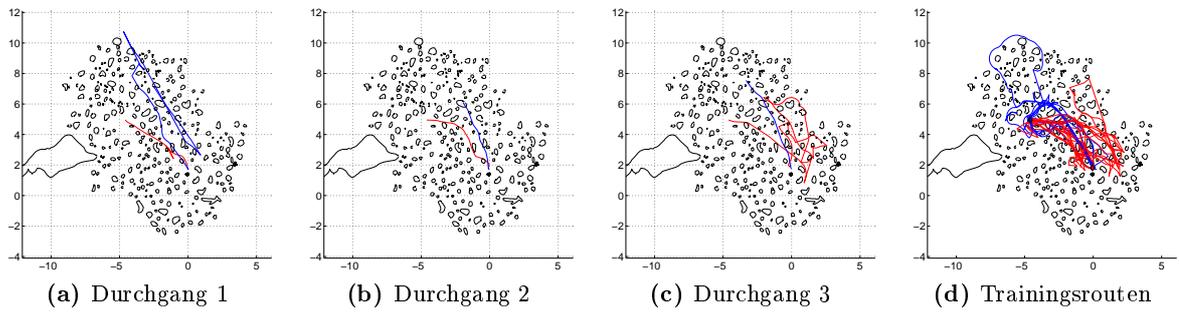


Abbildung 79: EH23. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

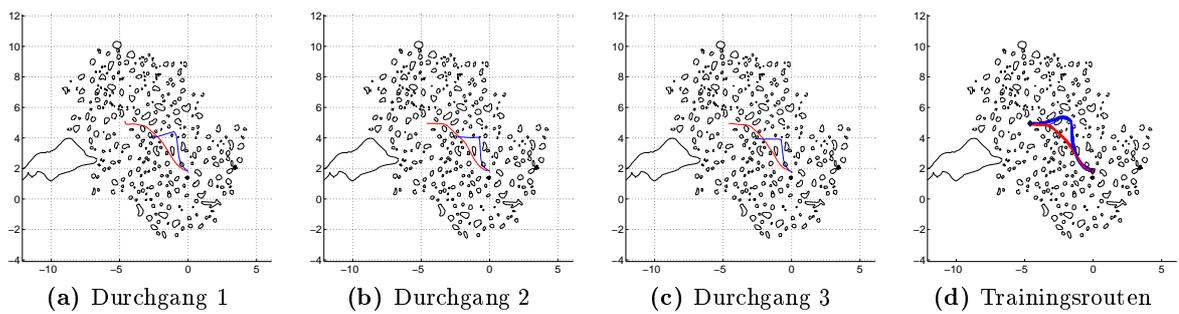


Abbildung 80: FW23. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

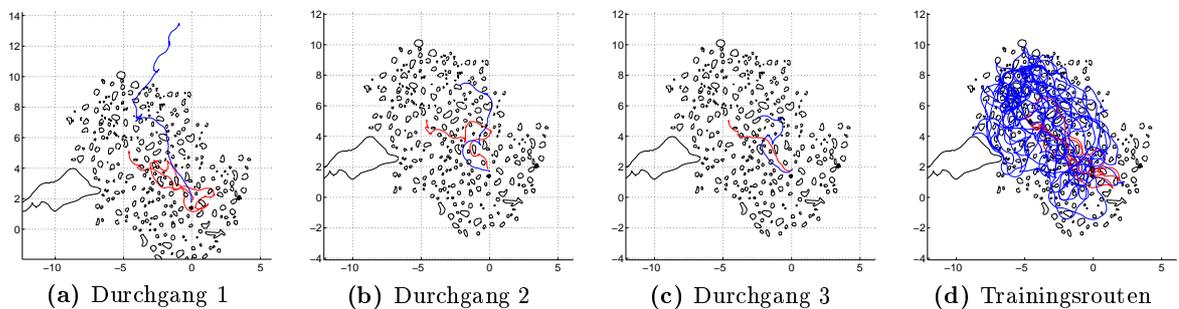


Abbildung 81: IW25. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

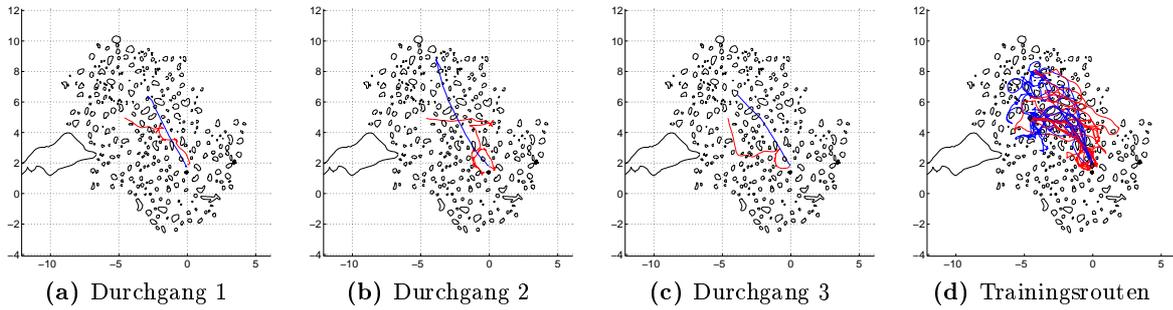


Abbildung 82: SM22. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgte Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

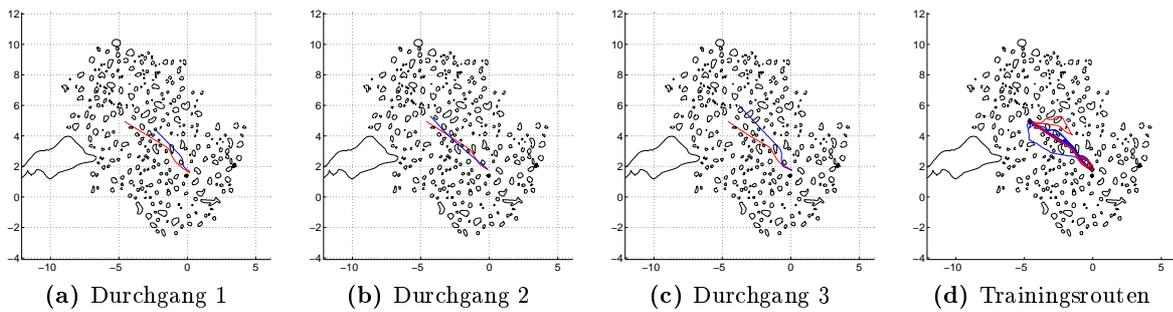


Abbildung 83: SN23. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgte Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

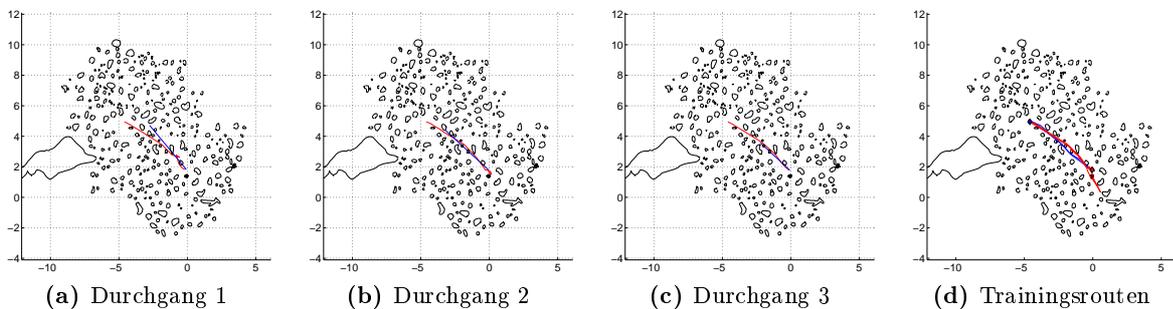


Abbildung 84: SP20. a bis c geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, d zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgte Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in a bis c ohne) in blau.

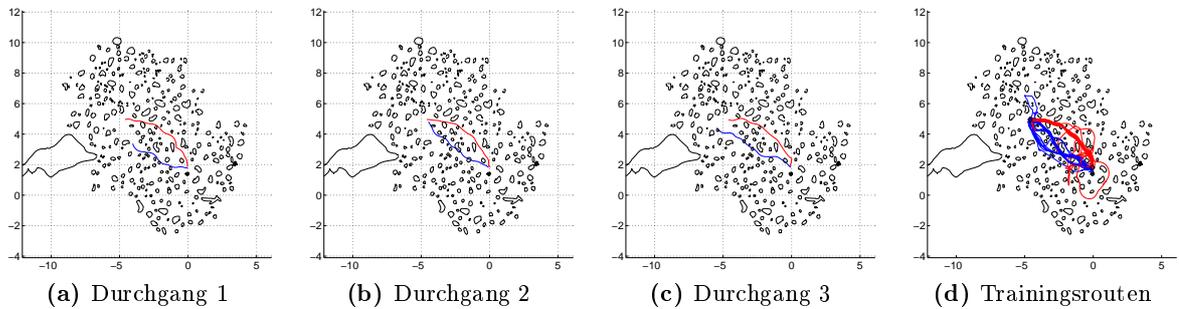


Abbildung 85: TK23. **a** bis **c** geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, **d** zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in **a** bis **c** ohne) in blau.

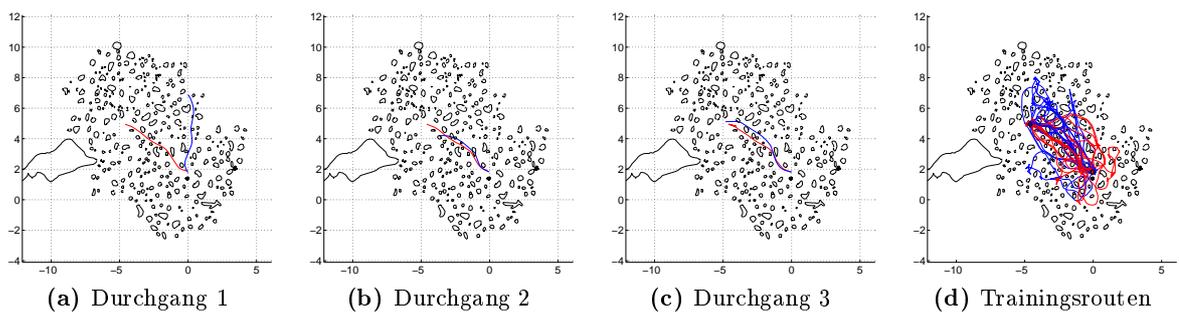


Abbildung 86: TS21. **a** bis **c** geben die Trajektorien im Versuch ohne lokale Landmarken wieder, **d** zeigt zum Vergleich die in der letzten Trainingssitzung verfolgten Routen. Pfade zum Feeder (lokale Landmarken in jedem Fall sichtbar) sind in rot dargestellt, Pfade zum Nest (im Training mit sichtbaren lokalen Landmarken, in **a** bis **c** ohne) in blau.

D.2.4 Pointen und anschließende Navigation zurück zum Nest

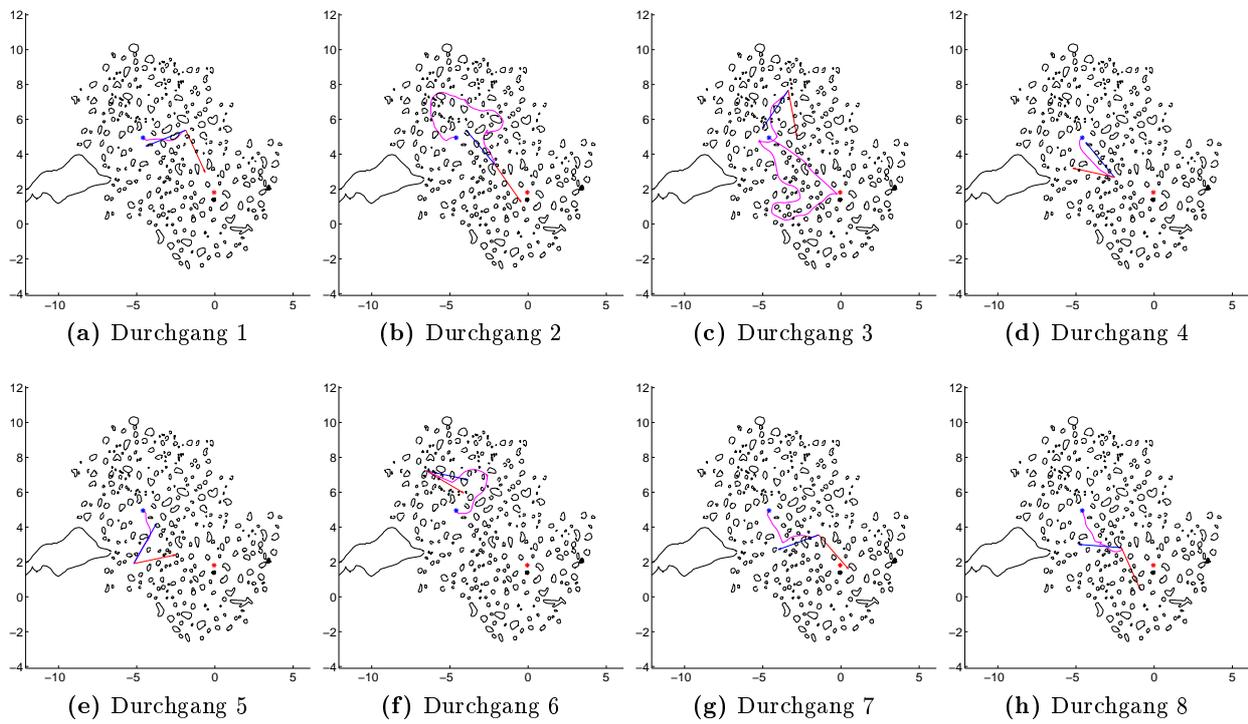


Abbildung 87: AN19: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

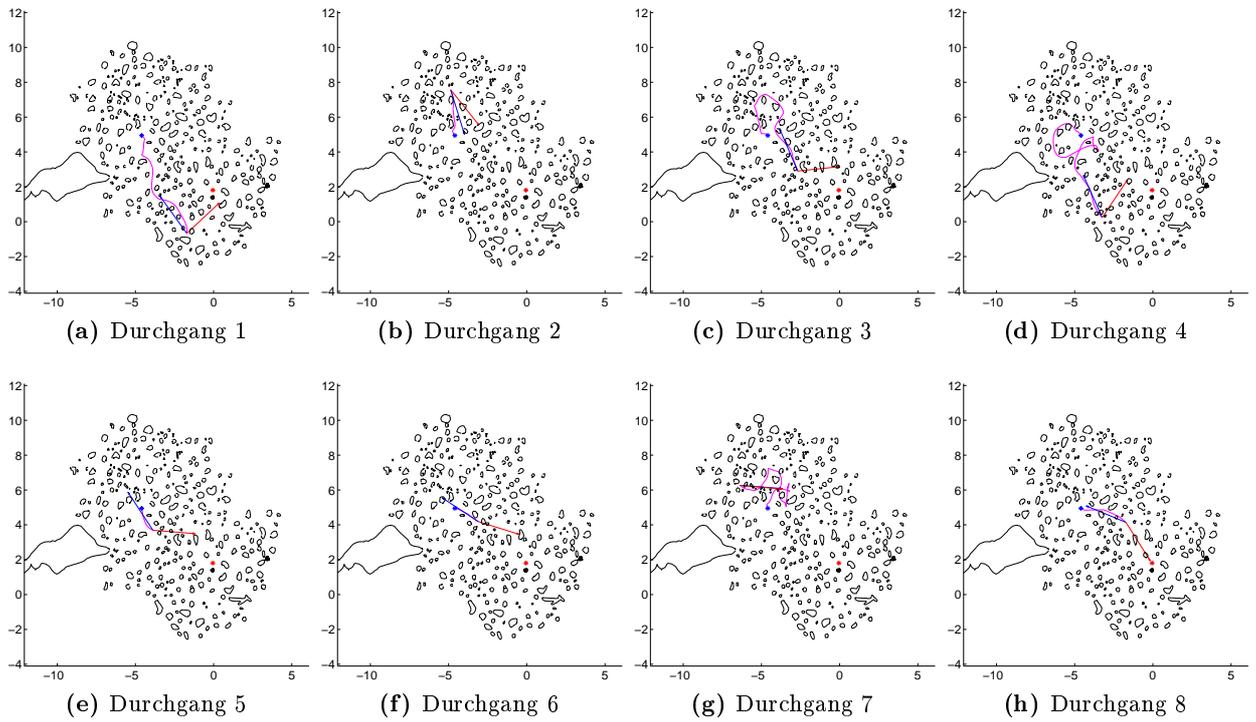


Abbildung 88: AS25: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

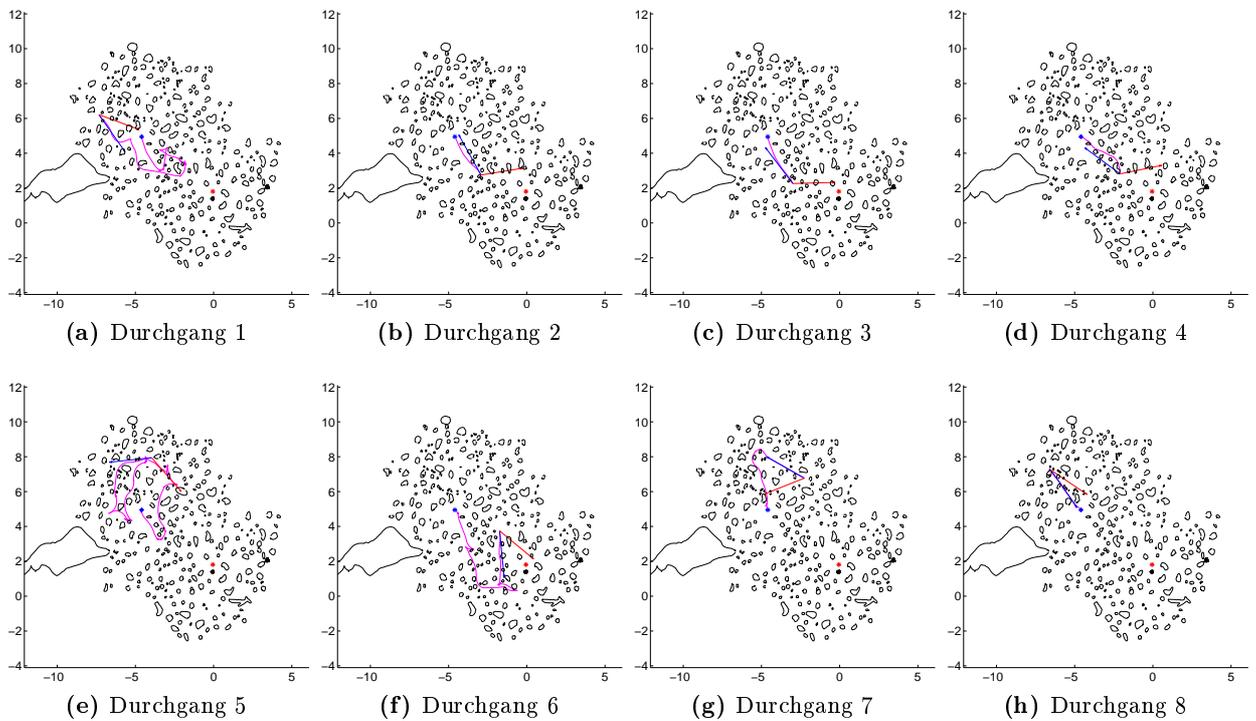


Abbildung 89: BG27: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

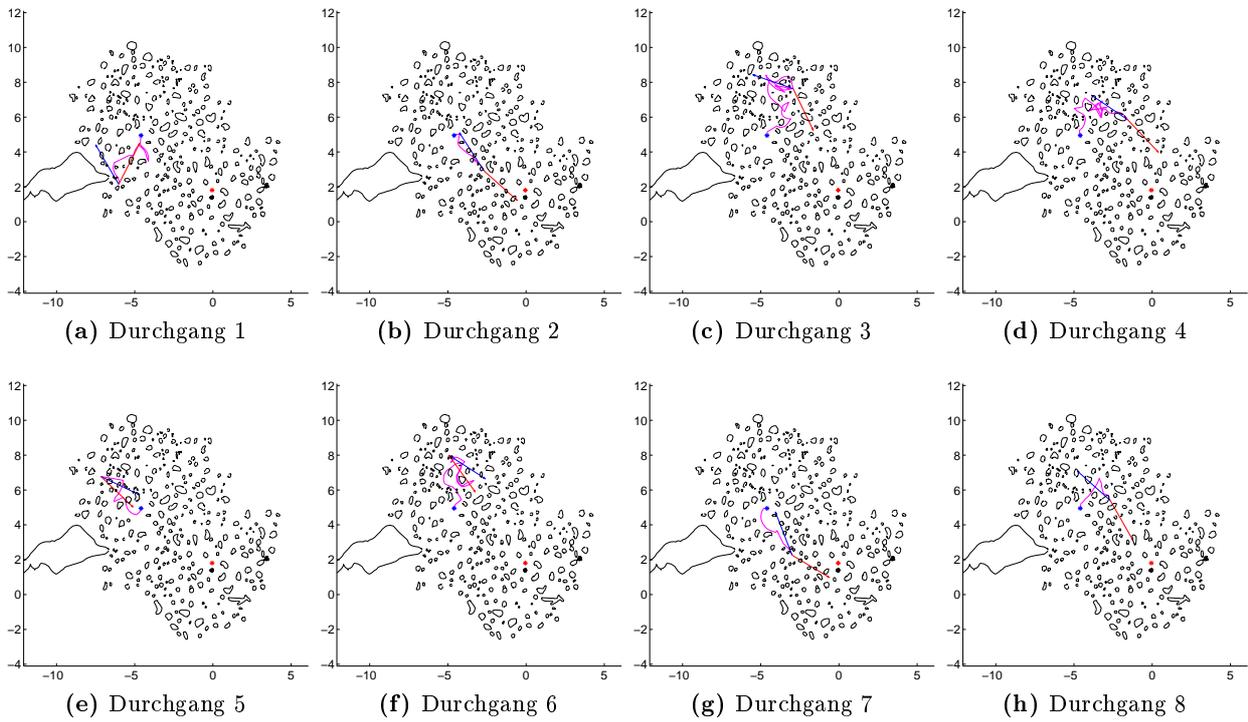


Abbildung 90: EH23: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

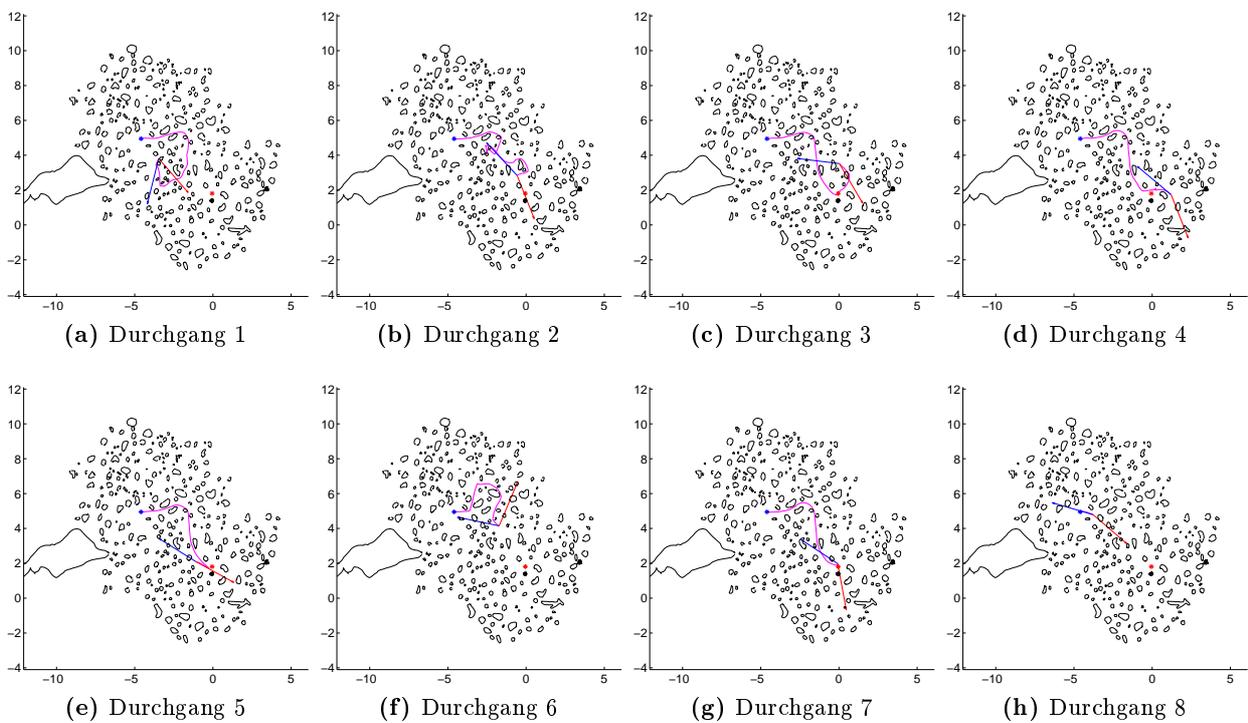


Abbildung 91: FW23: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

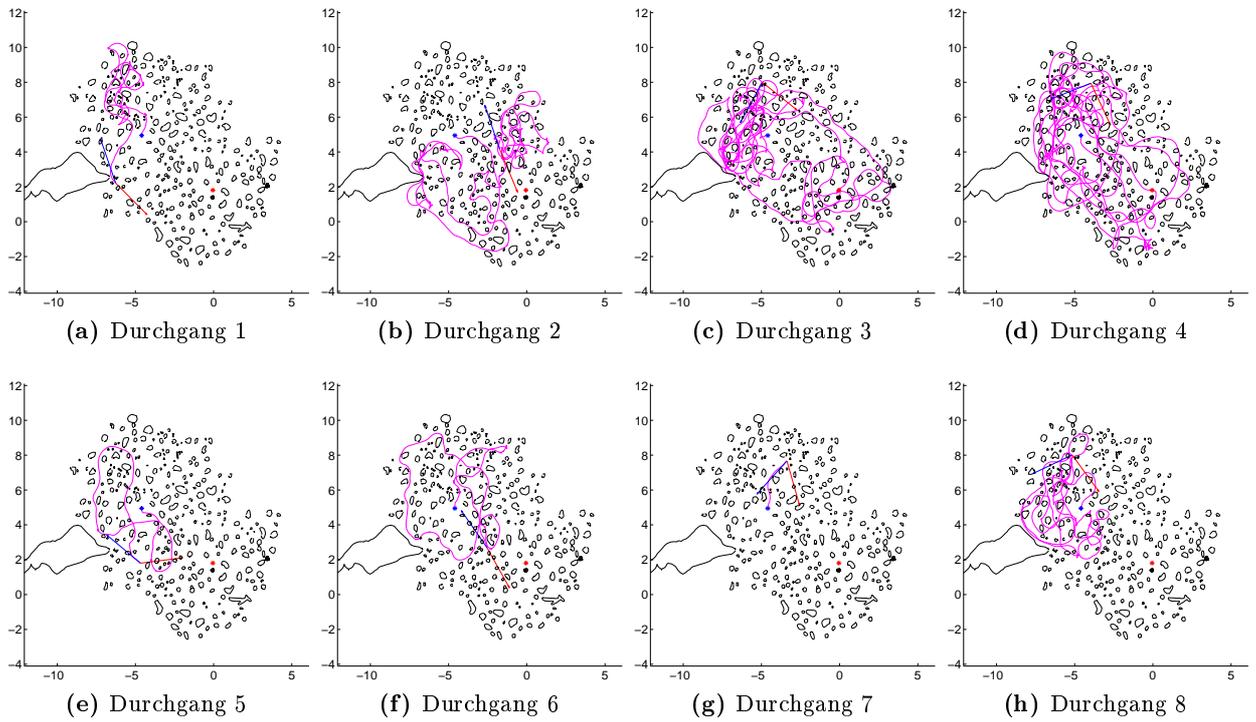


Abbildung 92: IW25: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

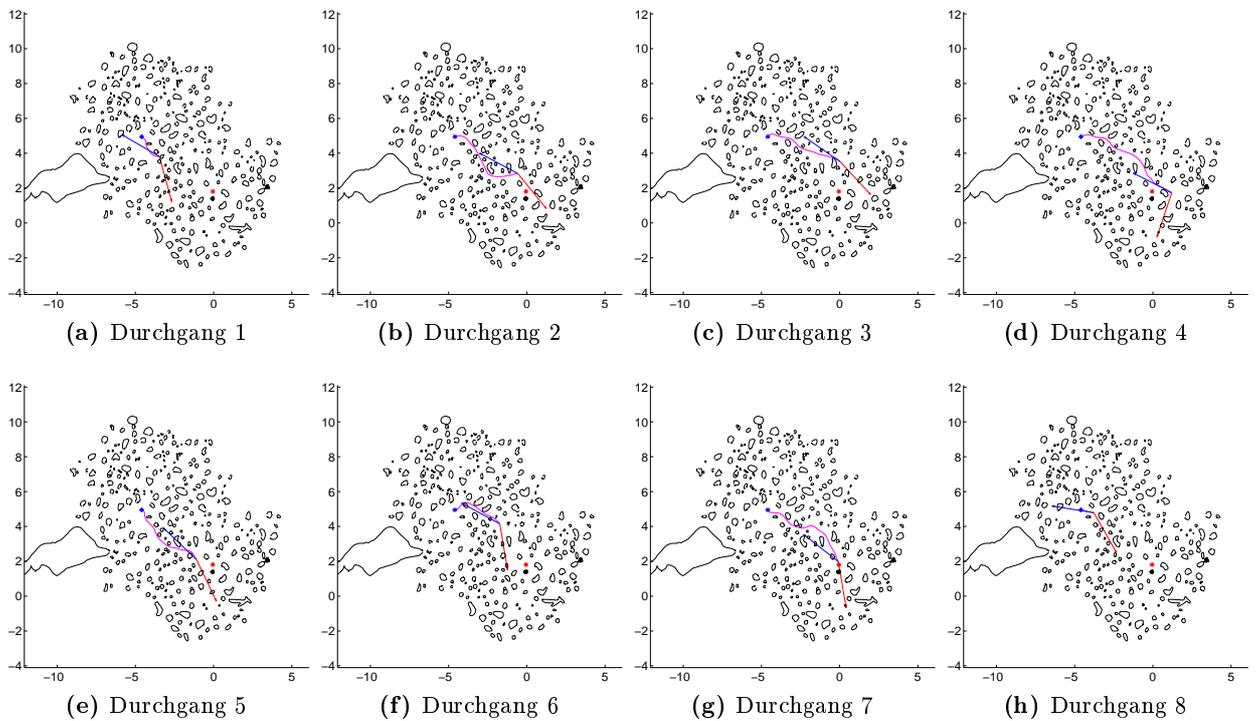


Abbildung 93: SM22: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

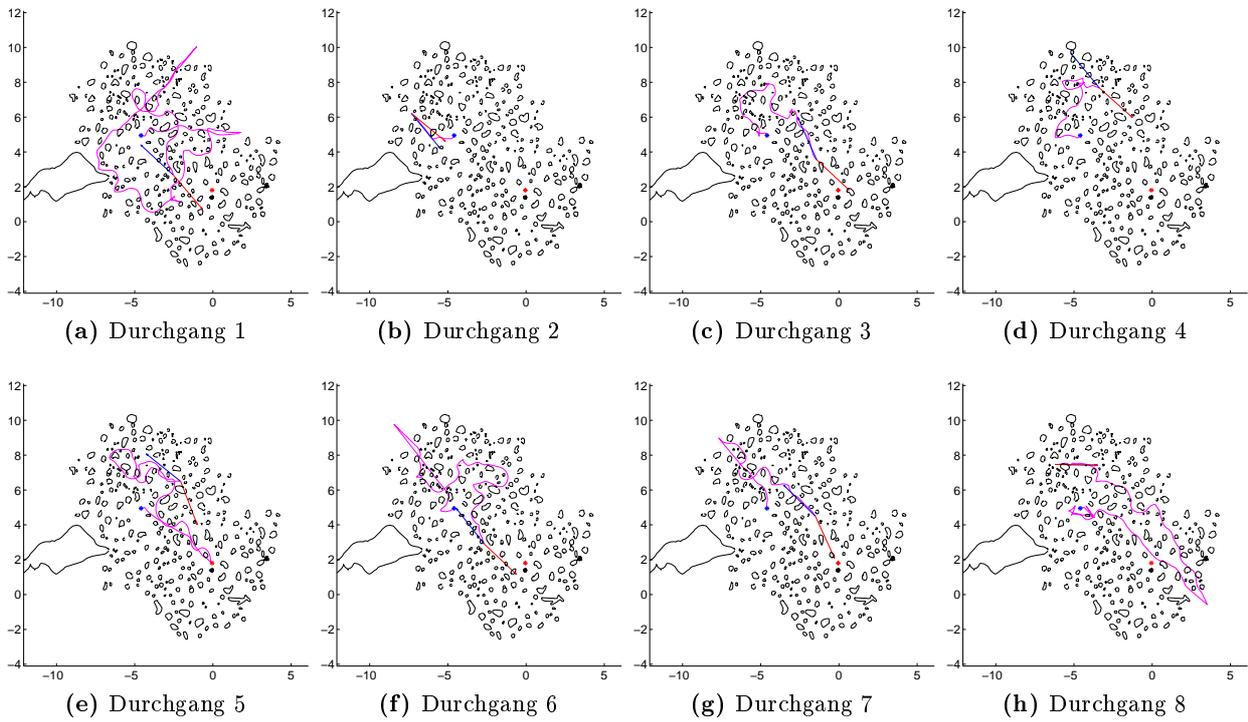


Abbildung 94: SN23: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

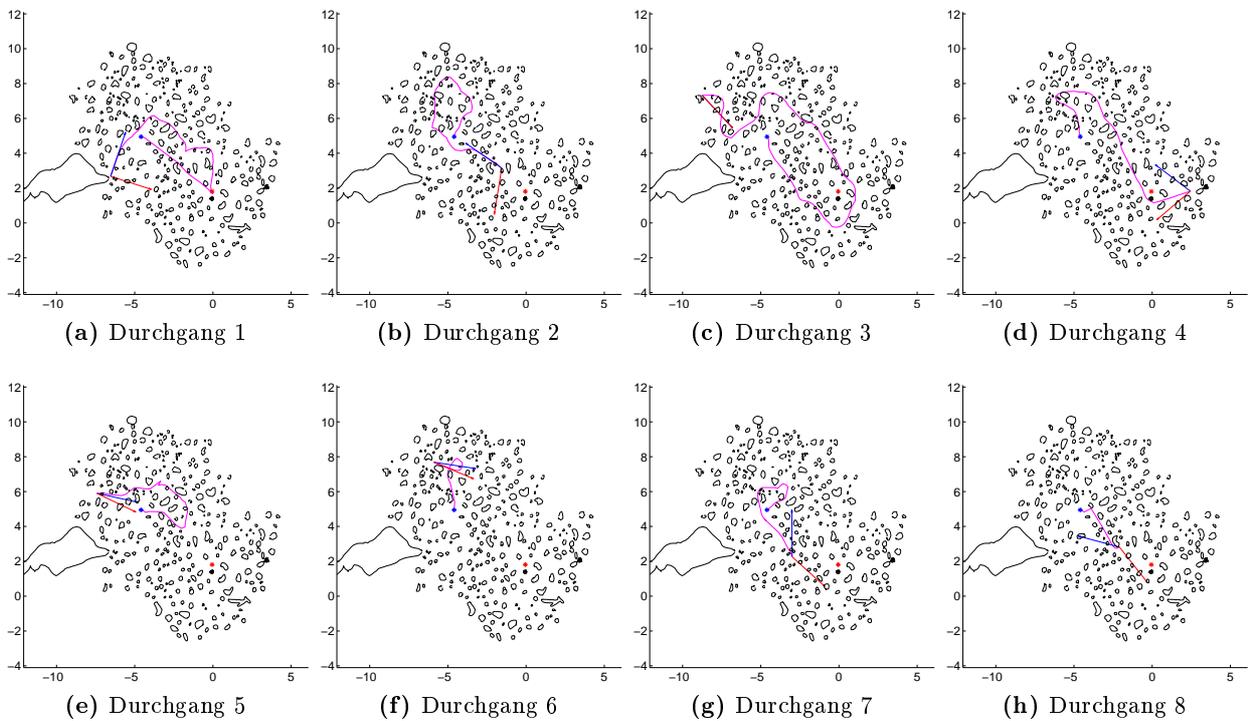


Abbildung 95: SP20: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

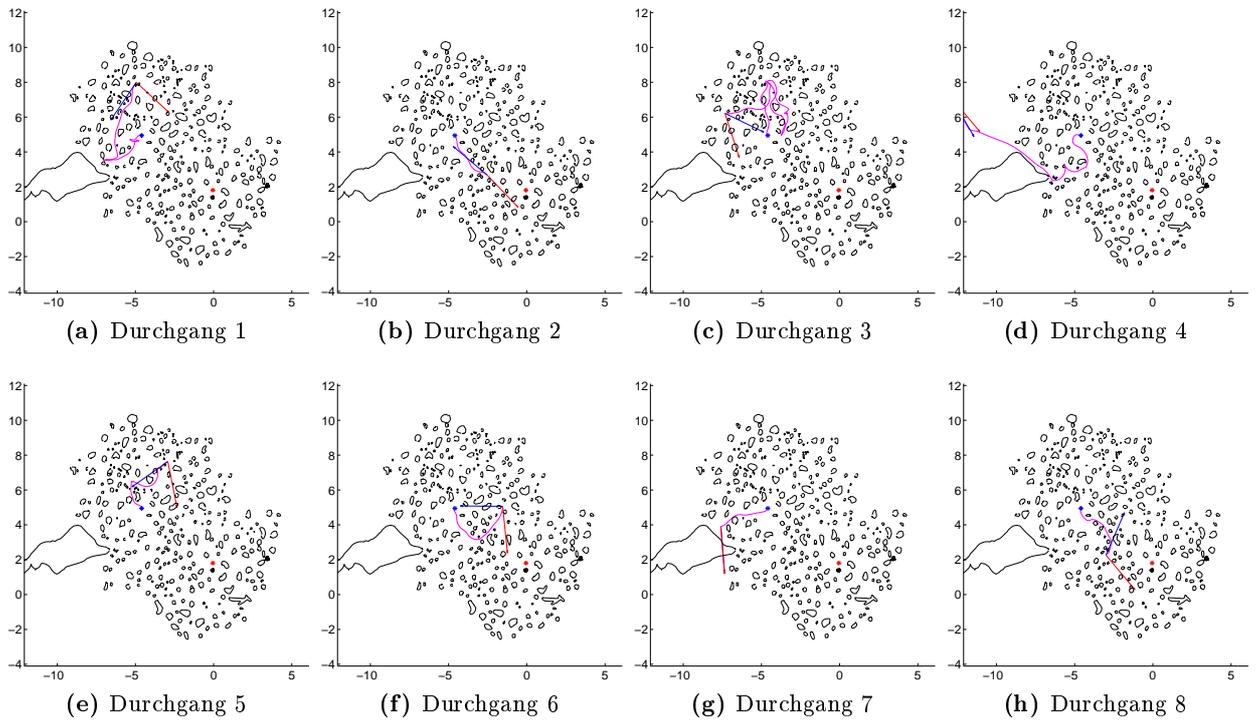


Abbildung 96: TK23: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

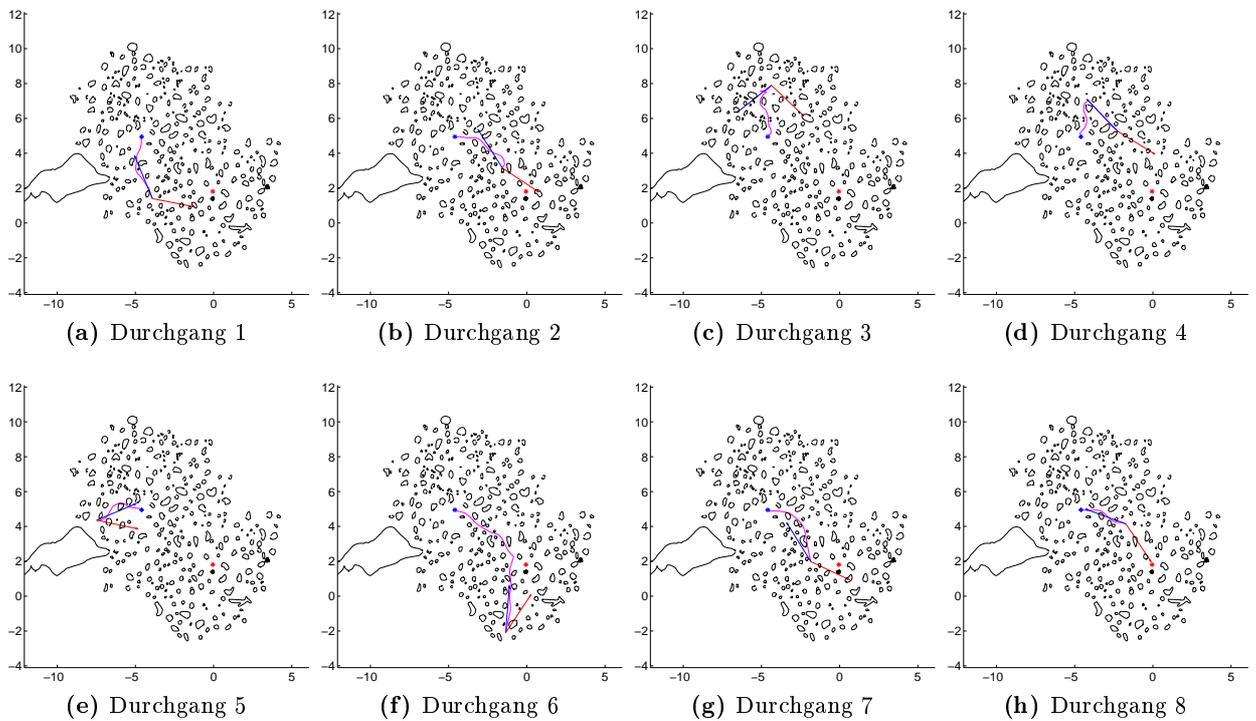


Abbildung 97: TS21: Pointingrichtungen zu Nest (blau) und Feeder (rot) und anschließende Trajektorien zurück zum Nest (magenta).

D.2.5 Suche

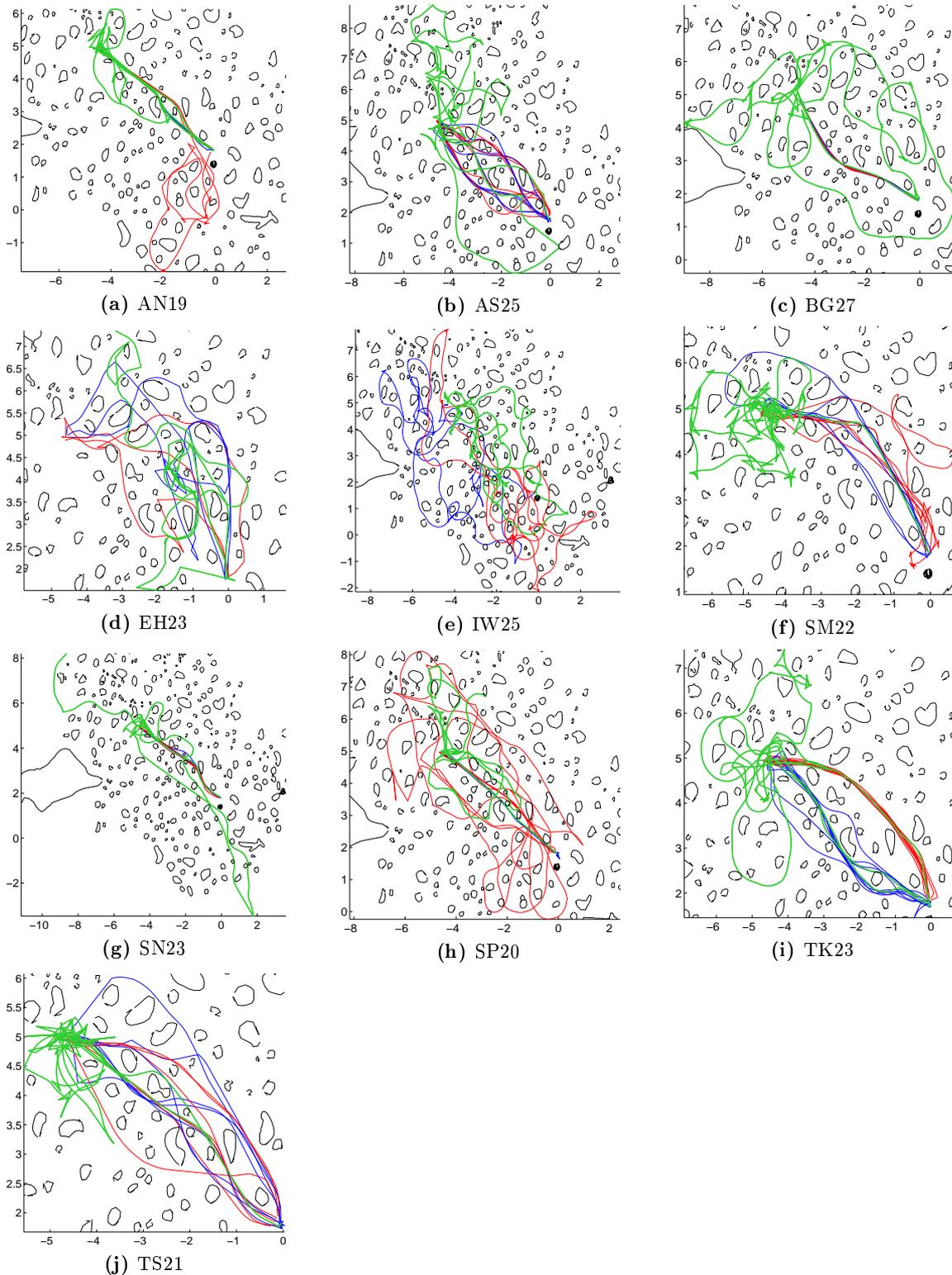


Abbildung 98: Trajektorien der einzelnen Probanden während der Suchdurchgänge. Für FW23 existiert keine Suche (Daten verloren). Pfade zum Feeder sind in rot dargestellt. Solange das Nest erschien sind die Pfade zum Nest in blau eingezeichnet. Die Trajektorie des letzten Durchganges zum Nest (eigentliche Suche) ist grün.