

# **Augenbewegungen und die Salienz von Landmarken in einer Wegfindeaufgabe**

**Diplomarbeit**  
der Fakultät für Biologie  
der Eberhard-Karls-Universität Tübingen

vorgelegt von

Röhrich, Wolfgang  
Tübingen, Februar 2008

Erklärung:

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

Tübingen, den

(Wolfgang Röhrich)

# Inhaltsverzeichnis

<b>A</b>	<b>EINFÜHRUNG</b> .....	<b>- 4 -</b>
<b>B</b>	<b>SALIENZTEST</b> .....	<b>- 8 -</b>
B 1	MATERIAL UND METHODEN .....	- 8 -
B 2	ERGEBNISSE .....	- 9 -
B 3	DISKUSSION .....	- 11 -
<b>C</b>	<b>HAUPTEXPERIMENT</b> .....	<b>- 12 -</b>
C 1	MATERIAL UND METHODEN .....	- 12 -
C 1.1	<i>Versuchspersonen</i> .....	- 12 -
C 1.2	<i>Aufbau</i> .....	- 12 -
C 1.3	<i>Aufzeichnung</i> .....	- 15 -
C 1.4	<i>Die virtuelle Umgebung</i> .....	- 16 -
C 1.5	<i>Aufgabenstellung und Ablauf</i> .....	- 18 -
C 1.6	<i>Auswertung</i> .....	- 23 -
C 2	ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....	- 27 -
C 2.1	<i>Dauer der Orientierungs- und Homingphase</i> .....	- 27 -
C 2.2	<i>Trajektorien</i> .....	- 29 -
C 2.3	<i>Laufstrecke</i> .....	- 31 -
C 2.4	<i>Endpunkte</i> .....	- 33 -
C 2.5	<i>Homingfehler</i> .....	- 34 -
C 2.6	<i>Blickvektoren, Fixationen und Salienz</i> .....	- 37 -
C 2.7	<i>Ausschluss von Versuchspersonen</i> .....	- 50 -
C 2.8	<i>Ausschluss einzelner Läufe</i> .....	- 51 -
<b>D</b>	<b>ANALYSE DES TRACKINGFEHLERS</b> .....	<b>- 55 -</b>
D 1	VERSUCH 1 .....	- 55 -
D 1.1	<i>Versuchsaufbau</i> .....	- 55 -
D 1.2	<i>Versuchsablauf</i> .....	- 56 -
D 1.3	<i>Ergebnisse</i> .....	- 56 -
D 2	VERSUCH 2 .....	- 57 -
D 2.1	<i>Versuchsaufbau</i> .....	- 57 -
D 2.2	<i>Analyse des Eyetrackers</i> .....	- 58 -
D 2.3	<i>Analyse des Headtrackers</i> .....	- 59 -
D 3	ERGEBNIS .....	- 62 -
D 4	FEHLERBEHEBUNG .....	- 63 -
<b>E</b>	<b>MANUELLE UND AUTOMATISCHE AUSWERTUNG</b> .....	<b>- 65 -</b>
E 1	DIGITALISIERUNG .....	- 65 -
E 2	AUSWERTUNG DES FILMS .....	- 65 -
E 3	VERGLEICH DER BEIDEN AUSWERTUNGSMETHODEN .....	- 66 -
E 4	DISKUSSION .....	- 67 -
<b>F</b>	<b>ABSCHLIEßENDE DISKUSSION</b> .....	<b>- 69 -</b>
<b>G</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>- 73 -</b>
<b>H</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>- 100 -</b>

## A Einführung

Der Untersuchung der Navigationsleistung von Menschen und Tieren und den zugrunde liegenden Mechanismen wurden bereits vielen Studien gewidmet. Durch die unterschiedliche Komplexität der jeweiligen Lebensräume und die individuellen kognitiven Fähigkeiten, über die die einzelnen Spezies verfügen, wurden mit der Zeit unterschiedliche Modelle entwickelt, um das Verhalten und die Strategie der jeweiligen Navigation zu erklären.

Je nach Umgebung kann bereits ein einfacher Mechanismus, der keine höheren kognitiven Fähigkeiten voraussetzt, ausreichen, um die Fortbewegung des Individuums in bestimmte Richtungen zu lenken. Mit Hilfe von Chemorezeptoren an mindestens zwei unterschiedlichen Orten des Organismus kann über die Feststellung eines Konzentrationsgradienten eine Richtung erkannt werden, an der sich der Organismus entlang bewegen kann. Dieses einfache System der Taxis setzt kein Gedächtnis voraus, in dem vorhergegangene Situationen mit der aktuellen verglichen werden, da ein Abgleich zwischen den Sensoren zum jeweiligen Zeitpunkt die notwendigen Informationen liefern kann (Mallot, 2000; Merkel, 1980).

Während sich beim Menschen und vielen Tieren das Auge als primäres Organ für die Informationsaufnahme zur Navigation entwickelt hat, gibt es auch Tierarten, bei denen sich bei der Anpassung an spezielle Lebensräume andere Rezeptoren als Hauptinformationsquelle entwickelt haben, so zum Beispiel die Echoortung bei vielen Fledermäusen und Zahnwalen.

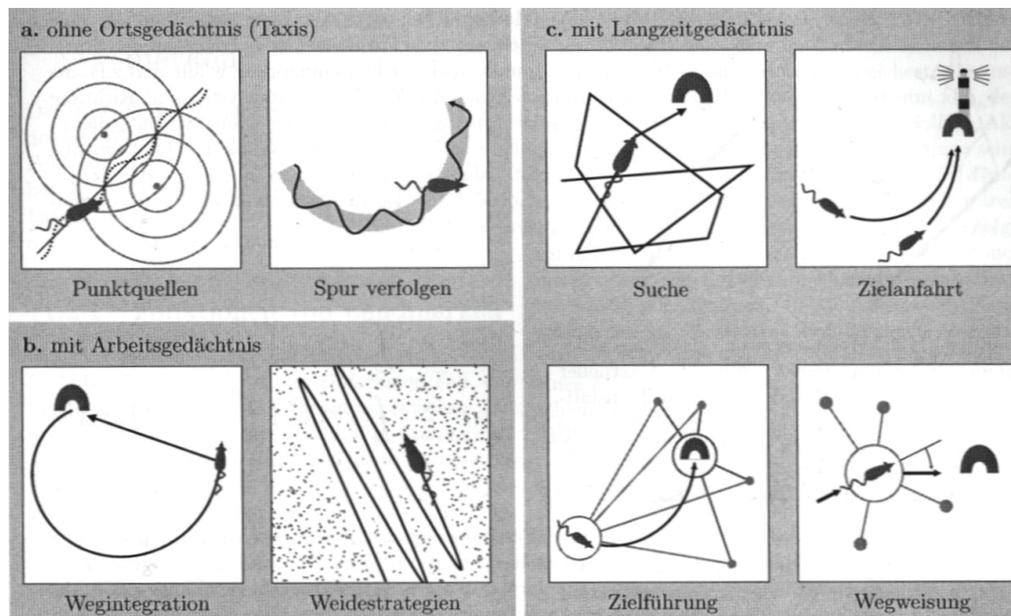
Um in komplexeren Umgebungen navigieren zu können, wird „das Vorhandensein eines Gedächtnisses voraus[gesetzt], da man ja mindestens das Ziel erkennen muss, wenn man es erreicht“ (Mallot, 2000).

Bei der visuellen Navigation mit Hilfe eines Langzeitgedächtnisses kann man vier unterschiedliche Mechanismen unterscheiden (siehe auch Abb. 1c). Die *Suche* charakterisiert sich durch ein Fortbewegen des Organismus in wechselnde Richtungen bis das zu findende Ziel wahrgenommen wird und er sich anschließend darauf zu bewegt. Für die *Zielanfahrt* wurde eine auffällige Struktur in der Nähe des Ziels memoriert. Beim Zurückkehren wird nun direkt auf diese Struktur zugesteuert, da bekannt ist, dass sich das Ziel in unmittelbarer Nähe dazu befindet. Dazu muss die Struktur auch aus größerer Entfernung sichtbar sein. Aufgrund der Funktion, die diese Struktur erfüllt, spricht man von einer Landmarke. Bei der *Zielführung* wird das Ziel durch mehrere Landmarken und die Winkel, die sie zueinander an diesem Punkt einnehmen, definiert. Bei der *Wegweisung* tritt eine Verkettung der zuvor beschriebenen Mechanismen ein, zusammen mit einer auszuführenden Aktion, sobald eines der Zwischenziele erreicht wurde.

Die Navigation mit Hilfe von Landmarken bei der Zielführung oder komplexeren Mechanismen bietet mehrere Möglichkeiten. Im einfachsten Fall wird dabei mit „Schnappschüssen“ gearbeitet. Dabei bewegt sich der Organismus bei der Rückkehr zum Ziel so lange fort, bis das aktuelle Netzhautbild mit dem memorierten übereinstimmt. Diese Art der Navigation wurde zum Beispiel bei Honigbienen nachgewiesen (Cartwright, Collett, 1983). Der Vorteil dieser Strategie liegt im geringen Aufwand der Bildprozessierung. Es ist nicht notwendig die Landmarken als

solche erkennen zu können, sondern es reicht aus, die beiden Bilder (das memorierte und das aktuelle) miteinander zu vergleichen. Ein aufwendigeres Verfahren setzt die Objekterkennung und Identifizierung von Landmarken voraus. Wenn die Landmarke über charakteristische Merkmale verfügt und diese erkannt werden, so ist es später möglich die Landmarke über diese Merkmale auch aus anderen Perspektiven wieder zu erkennen. Werden gar mehrere Landmarken erkannt, memoriert und auch der Bezug dieser Landmarken zueinander berücksichtigt, so kann eine Navigation erfolgen, bei der der Navigierende weiß, ob er sich diesselts oder jenseits gedachter Verbindungslinien zwischen zwei Landmarken befindet. Werden dabei mehrere Verbindungslinien zwischen Landmarken genutzt, so ist es durch einfache „befinde mich rechts von dieser und links von jener Linie“ - Abfragen möglich eine relativ genaue Positionsbestimmung durchzuführen.

Zusätzlich gibt es noch viele weitere visuelle Informationsquellen, die als Landmarken dienen können, wie zum Beispiel Hangneigungen.



**Abb. 1: Übersicht über verschiedene Navigationsstrategien (Mallot, 2007).**

Wenn nun untersucht werden soll welche Objekte als Landmarken genutzt werden, so stellt sich die Frage, wie man „von außen“ als Experimentator einen Einblick in die gedanklichen Abläufe der Versuchsperson bekommen kann.

Die Untersuchung der Augenbewegungen von Personen, die alltäglichen Aufgaben wie zum Beispiel Teekochen nachgingen, zeigte, dass die Augen bei einem komplexeren Handlungsablauf nach Beendigung einer Einzelaktion immer das nächste Objekt fixierten, bevor sich die Person diesem Objekt mit dem Körper zuwandte. Michael Land und Mary Hayhoe schlossen daraus, dass Augenbewegungen in das Bewegungsmuster einer manipulativen Aktion eingeplant werden und ihr vorausgehen (Land, Hayhoe, 2001). Auch beim Laufen einer Strecke finden antizipatorische Augenbewegungen statt. So lenken Versuchspersonen ihre Blicke auf die Wegstrecke, in deren Richtung sie gehen werden (Hollands, Patla, Vickers, 2002). Der Idee, Augenbewegungen von Personen zu erfassen und daraus

auf Vorgänge im Gehirn zu schließen wird schon lange nachgegangen. Bereits in der Mitte des letzten Jahrhunderts hatte Alfred Yarbus die Augenbewegungen von Personen ermittelt, die Bilder von Personen oder Szenen betrachteten und dadurch ihren Aufmerksamkeitsfokus zum jeweiligen Zeitpunkt bestimmt (Yarbus, 1967). Durch die Messung der Augenbewegungen ist es also möglich auf den momentanen Aufmerksamkeitsfokus und die zukünftige Aktion einer Person zu schließen. Mittlerweile ist das so genannte „Eyetracking“ eine etablierte Methode und wird in vielen Studien angewendet; so auch in dieser Diplomarbeit.

Bereits in den Versuchen von Alfred Yarbus zeigte sich, dass je nach Aufgabenstellung (das Alter, die finanziellen Verhältnisse der Personen auf dem Bild schätzen, etc.) unterschiedliche Augenbewegungsmuster entstanden. Auch bei den oben genannten Versuchen hatten die Versuchspersonen eine Aufgabe zu erfüllen. Das bedeutet, dass der Aufmerksamkeitsfokus auf einen Punkt gelenkt wurde, der zur Erfüllung der Aufgabe notwendig war. Es ist jedoch auch hinlänglich bekannt, dass der Blick und die Aufmerksamkeit auf Dinge gelenkt werden, auch wenn sie nicht mit der Aufgabe in Zusammenhang stehen. So fällt auf einem Bild mit grünen Äpfeln sofort der einzige rote Apfel auf, ohne dass nach diesem gesucht werden muss.

Dieses „den Blick auf sich ziehen“ wird in der Literatur „salient“ beziehungsweise „Salienz“ genannt und beschreibt ein allgemeines „Hervorheben“ eines Reizes von anderen Reizen. Dabei spielen zwei Mechanismen in der Reizverarbeitung eine wichtige Rolle: In der so genannten „bottom-up“-Verarbeitung ist das Objekt im Besitz von charakteristischen Merkmalen, die es von den anderen umgebenden Objekten abheben. Ohne das Zutun des Beobachters zieht es die Aufmerksamkeit auf sich. Aktuelle Studien bekräftigen die Hypothese, dass diese „bottom-up“-Verarbeitung im primären visuellen Areal (V1) des Gehirns stattfindet (Koene, Zhaoping, 2007).

Bei der „top-down“-Verarbeitung hat der Beobachter eine bestimmte Intention und ist auf der Suche nach einem oder mehreren Objekten, die den Suchkriterien entsprechen. In diesem Fall sind die Unterscheidungskriterien vom Beobachter durch seinen motivationalen Kontext definiert, während sich bei der „bottom-up“-Verarbeitung die Kriterien aus den charakteristischen Merkmalen des Objekts und seiner Umgebung bestimmen. Die „top-down“-Verarbeitung findet auch unterbewusst statt; so werden beispielsweise die Augen einer Person meist zuerst und länger fixiert als andere Gesichtspartien, auch wenn jene Region verdeckt und somit kein sich optisch hervorhebender Reiz vorhanden ist (Guo, 2007).

Mittlerweile existieren Modelle, die die Salienz bei der Verarbeitung von visuellen Reizen beschreiben. Laurent Itti und Christof Koch zeigen ein Computermodell, das saliente Punkte in einem Bild detektiert. Das Modell basiert auf einer oder mehreren „saliency maps“, in denen Neurone in einen Wettstreit treten und der „Gewinner“ den neuen Aufmerksamkeitsfokus vorgibt (Itti, Koch, 2000). In einer anderen Studie wird ein weiteres Computermodell vorgestellt, das unter anderem eine abgeänderte Kombination der „saliency maps“ beinhaltet. Es wird weiterhin zwischen mehreren aktuellen Modellen verglichen und die Übereinstimmung mit experimentell gewonnenen Daten von Versuchspersonen geprüft, wobei sich das vorgestellte Computermodell durch eine schnellere Berechnung auszeichnet (Le Meur, Le Callet, Barba, 2007).

In dieser Diplomarbeit soll mit Hilfe der virtuellen Realität die Landmarkenwahl von Versuchspersonen bei einer Wegfindeaufgabe anhand ihrer Augenbewegungen bestimmt und ein Versuchsablauf entwickelt werden, mit der diese Bestimmung durchgeführt werden kann.

Dazu sollen Versuchspersonen Wegfindeaufgaben („homing tasks“) lösen, indem sie sich in einer virtuellen Umgebung einen Zielpunkt einprägen und anschließend von einem anderen Startpunkt aus zu diesem Zielpunkt zurückfinden. Als Orientierungshilfe stehen ihnen mehrere Objekte zur Verfügung, die in der Umgebung platziert sind. Es wird vermutet, dass einige der Objekte als Landmarken genutzt werden und anderen hingegen keine Funktion in dieser Aufgabenstellung zukommen wird. Um die Wahl der Landmarken nachvollziehen zu können, werden im Laufe des Experiments einige Objekte ausgeblendet und die Veränderung der Leistung den Zielpunkt zu finden geprüft.

Hypothese: Beim Ausblenden von hochsalienten Objekten werden die Versuchspersonen den Zielpunkt schlechter finden, als wenn niedersaliente Objekte ausgeblendet werden. Wenn sich die Hypothese bestätigt, wäre ein Versuchsdesign zur Bestimmung der Salienz von Objekten (in solch einer Aufgabenstellung) gefunden.

Diese Arbeit beinhaltet in vier Experimente. In einem Vorversuch (Salienztest) wurde die Salienz von Objekten in einem Lernparadigma ermittelt und damit Informationen für das Design des Hauptversuches gesammelt. Im Hauptversuch wurde die Navigation und Landmarkennutzung von Versuchspersonen bei einer Wegfindeaufgabe untersucht. Der Trackingtest beschreibt ein Experiment, mit dem nach einem schwerwiegenden Fehler bei der Datenaufzeichnung die Funktionalität der Messsysteme überprüft wurde. Der Vergleich zwischen der manuellen und automatischen Auswertung beschreibt schließlich zwei Methoden, die zur Ermittlung der Blickrichtungen von Versuchspersonen eingesetzt wurden.

Die Definition der Salienz beruht in den folgenden Experimenten sowohl auf der „bottom-up“- als auch der „top-down“-Verarbeitung, da das Versuchsdesign keine hundertprozentige Trennung ermöglicht. Im Vorversuch liegt der Schwerpunkt der Reizverarbeitung auf dem „bottom-up“-Level, da den gezeigten Objekten in diesem Fall keine durch den Versuch vorgegebene Funktion zukommt. Dennoch könnten manche Objekte für eine Versuchsperson eine persönliche Funktion erfüllen, so zum Beispiel die Erinnerung an ein Haustier hervorrufen, oder in einem Kontext stehen, mit dem sich der Proband erst kürzlich befasst hat. In diesen Fällen würde neben der visuellen „bottom-up“-Verarbeitung auch ein weiterer Verarbeitungsschritt hinzukommen, nämlich der Verknüpfung mit anderen Erinnerungen. Diese zusätzlichen Verknüpfungen lassen sich bei Objekten, wie sie in diesen Experimenten verwendet wurden, nicht vermeiden.

Im Hauptversuch liegt der Schwerpunkt bei der „top-down“-Verarbeitung, da die Versuchspersonen die Objekte anhand ihrer „Nützlichkeit“, den Zielpunkt wieder zu finden, auswählen müssen. Auch hier besteht die oben erwähnte Möglichkeit, dass Versuchspersonen mit den Objekten Erinnerungen verknüpfen. Im Gegensatz zum Salienztest sind im Hauptversuch mehrere Objekte gleichzeitig zu sehen. Aus diesem Grund werden durch die unterschiedliche Farbgebung manche Objekte durch die „bottom-up“-Verarbeitung eher den Blick und die Aufmerksamkeit auf sich ziehen als andere.

## **B Salienztest**

In diesem Lerntest wurden den Versuchspersonen in einer Lernphase mehrere Objekte gezeigt, die sie später in der Testphase von anderen unbekanntem Objekten unterscheiden sollten. Es wurde erwartet, dass sich die Versuchspersonen an manche Objekte besser erinnern können als an andere und sich somit eine Aussage über die Salienz der Objekte treffen lässt.

### **B 1 Material und Methoden**

Für die Präsentation der Objekte und die Aufzeichnung der Daten wurde ein Laptop (Inspiron 8500) der Firma Dell mit einem 15,4 Zoll Display benutzt. Als Versuchspersonen nahmen 22 männliche Studenten teil, welche auf dem Universitätsgelände angesprochen wurden. Die Versuchspersonen wurden in einer Entfernung von etwa 50 cm vom Monitor des Laptops entfernt platziert.

Für den Test wurden 42 verschiedene Objekte verwendet, darunter Tiere (Elefant, Hase, Katze, Goldfisch, ...), mathematische Körper (Kugel, Pyramide, Kegel, Spirale, ...) und andere unbelebte Objekte (Birne, Tisch, Baum, Flasche,...); siehe Anhang für eine komplette Liste der Objekte. Die Objekte unterschieden sich zusätzlich durch ihre Farbgebung. Alle Objekte wurden auf eine einheitliche Größe skaliert, so dass sie gut zu erkennen waren und etwa ein Drittel des Bildschirms in vertikaler Richtung durch sie bedeckt war (Abb. 2).

Alle Objekte wurden vor demselben Hintergrund gezeigt, welcher aus einer grünen Wiese vor einem Bergpanorama bestand. Im oberen Bereich war ein Schriftzug der verwendeten Visualisierungssoftware zu sehen. Die Versuchspersonen konnten aus dem Hintergrund keine zusätzlichen Informationen ziehen, welche für die Lösung der Aufgabe relevant gewesen wären.

Im ersten Teil des Versuchs wurden die Versuchspersonen instruiert, sich die in der Lernphase erscheinenden Objekte einzuprägen. Ihnen wurden dazu nacheinander 21 der 42 Objekte für jeweils 500 Millisekunden in pseudorandomisierter Reihenfolge gezeigt.

Anschließend erfolgte eine Ablenkungsaufgabe, bei der die Versuchspersonen 16 einfache Mathematikaufgaben zu lösen hatten. Diese Zwischenaufgabe wurde gewählt, um die Versuchspersonen daran zu hindern, die Aufgabe mit Hilfe des Kurzzeitgedächtnisses zu lösen.

Der dritte Teil des Versuchs bestand aus der Testphase, in der den Probanden in pseudorandomisierter Abfolge nacheinander alle 42 Objekte gezeigt wurden. Das jeweilige Objekt wurde so lange auf dem Bildschirm angezeigt, bis der Proband eine Entscheidung getroffen hatte, ob ihm das Objekt bekannt ist oder nicht und dementsprechend auf dem Laptop eine Taste für „ja“ oder „nein“ gedrückt hatte.

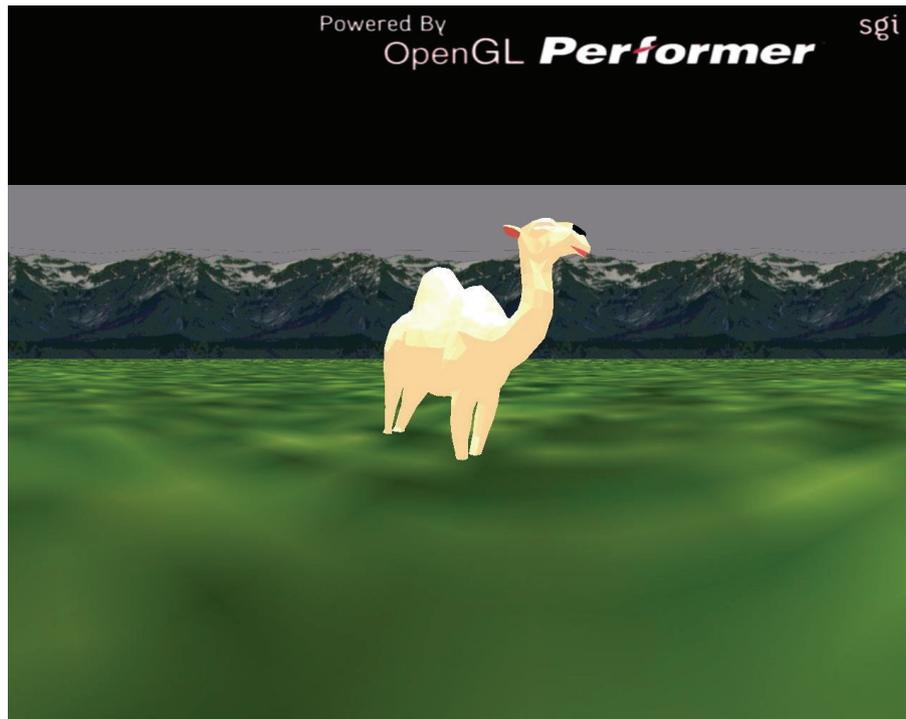


Abb. 2: Beispielfoto eines der gezeigten Objekte: Zu sehen ist hier das Objekt „Kamel“. Während die Objekte nacheinander in der Bildmitte gezeigt wurden, waren sowohl der oben eingeblendete Schriftzug als auch die Wiese und die Berge immer zu sehen.

## B 2 Ergebnisse

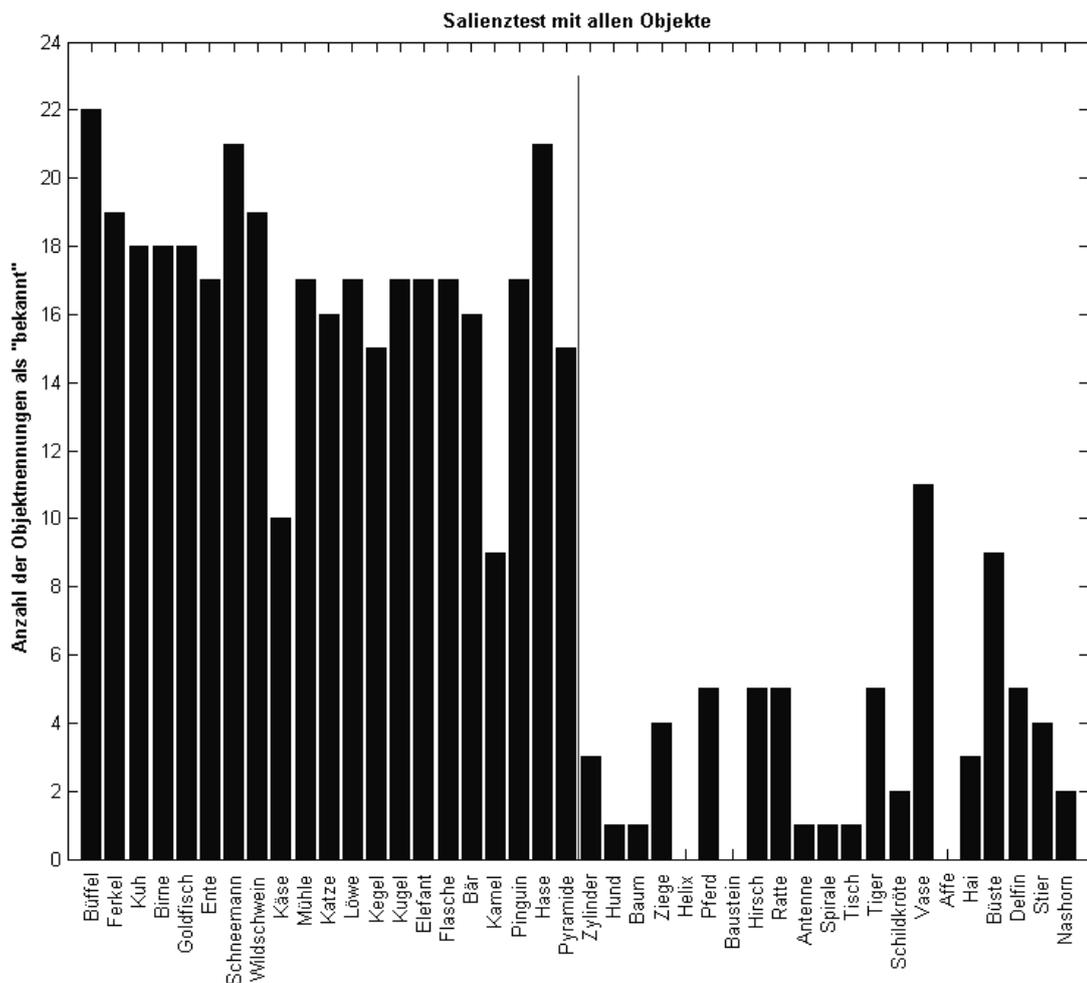
Von den 21 zu erkennenden Objekten wurden im Mittel 16,18 erkannt (Standardabweichung 3,62), von den 21 abzulehnenden Objekten wurden im Mittel 17,91 abgelehnt (Standardabweichung 2,31). Durchschnittlich 4,82 Objekte wurden fälschlicherweise ebenfalls abgelehnt, wohingegen 3,09 Objekte fälschlicherweise als bekannt eingestuft wurden (Tab. 1). Der Sensitivitätsindex ( $d'$ ), der in diesem Fall angibt wie gut die Versuchspersonen zwischen gezeigten und nicht gezeigten Objekten unterscheiden konnten, lag bei 1,789.

<i>Objekt</i>	<i>Antwort der Versuchsperson</i>	
	bekannt	unbekannt
wurde gezeigt	Treffer 16,18 ± 3,62	Verpasser 4,82 ± 3,62
wurde nicht gezeigt	falscher Alarm 3,09 ± 2,31	korrekte Ablehnung 17,91 ± 2,31

Tab. 1: Antwortverhalten der Versuchspersonen: Die linke Spalte zeigt, ob das Objekt zu Beginn gezeigt wurde (= bekannt) oder nicht (= unbekannt). Auf der rechten Seite sind die Antworten der Versuchspersonen dargestellt (Mittelwerte mit Standardabweichung). Die Felder mit den richtigen Antworten sind grün eingefärbt.

Die Ergebnisse zeigen eine ungleiche Verteilung der als bekannt genannten Objekte. Als einziges Objekt wurde der Büffel von allen Versuchspersonen als „bekannt“ erkannt, wohingegen der Großteil der Objekte von 77 % der Versuchspersonen erkannt wurde. Auf das am seltensten genannte Objekt (Kamel) entfallen neun Nennungen, was 41 % der Probanden entspricht.

Bei den 21 Objekten, die anfangs nicht gezeigt wurden und damit als unbekannt einzustufen waren, wurde ein Objekt elfmal (= 50 %), ein zweites neunmal (= 41 %) fälschlicherweise als bekannt angegeben. Drei Objekte wurden von allen Versuchspersonen richtigerweise als unbekannt eingestuft (Abb. 3).

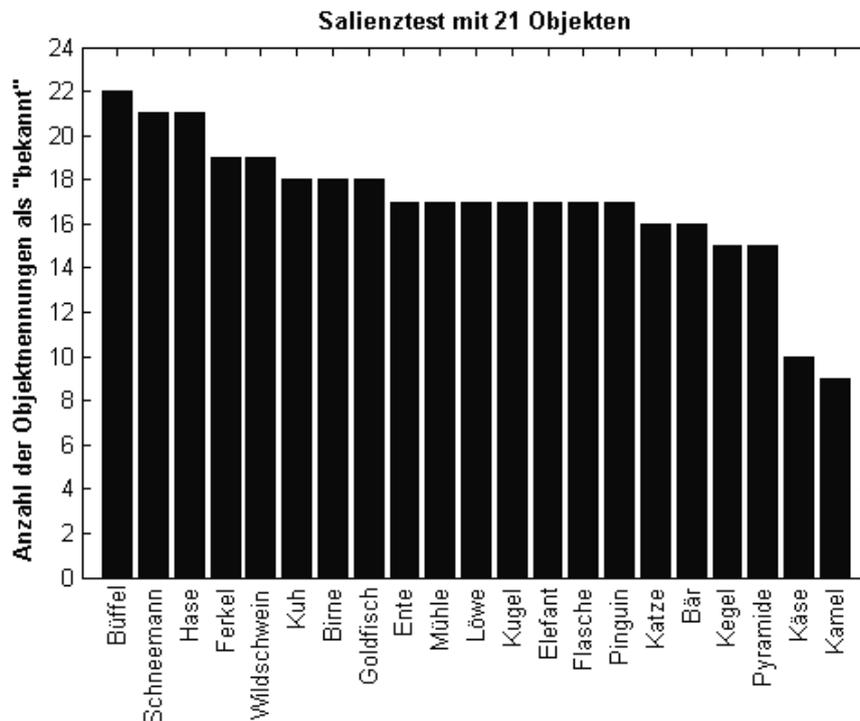


**Abb. 3: Ergebnisse des Salienztests:** Auf der X-Achse sind die verschiedenen Objekte aufgetragen. Auf der linken Hälfte befinden sich die Objekte, die in der Lernphase gezeigt wurden, auf der rechten Hälfte die Objekte, die in der Testphase zusätzlich abgefragt wurden. Auf der Y-Achse ist die Anzahl der Nennungen als „bekannt“ aufgetragen.

### B 3 Diskussion

Die Versuchspersonen waren in der Lage sich trotz der sehr kurzen Präsentationszeit von 500 Millisekunden den Großteil der Objekte einzuprägen und von den nicht gezeigten zu unterscheiden. Es fällt auf, dass bei den gezeigten Objekten zwei Objekte (Kamel und Käse) hervorstechen, an die sich die Versuchspersonen nur sehr schlecht erinnern konnten. Dem gegenüber stehen ebenfalls zwei Objekte (Vase und Büste) aus der unbekanntem Gruppe, die die Versuchspersonen als vermeintlich bekannt einstufen. In Abb. 4 wurde die Gruppe der Objekte, welche in der Lernphase gezeigt wurden, nach der Häufigkeit der Nennungen sortiert. In dieser Darstellung erkennt man neben einem breiten Mittelteil eine kleine Gruppe mit drei Objekten (Büffel, Schneemann und Hase), die sehr viele Nennungen aufweist und die bereits oben erwähnte Zweiergruppe mit sehr wenigen Nennungen.

Somit lässt sich eine Einteilung bezüglich der Salienz der Objekte treffen, wobei die Objekte Büffel, Schneemann und Hase zu hochsalienten und die Objekte Käse und Kamel zu den niedersalienten Objekten zu zählen sind.



**Abb. 4:** Ergebnisse des Salienztests der in der Lernphase gezeigten Objekte: Auf der X-Achse sind die verschiedenen Objekte aufgetragen, auf der Y-Achse ist die Anzahl der Nennungen als „bekannt“ aufgetragen, je Objekt aufsummiert und anschließend der Häufigkeit nach geordnet

## **C Hauptexperiment**

Im Hauptexperiment wurde die Navigationsleistung von Versuchspersonen in einer virtuellen Umgebung untersucht, in der sie sich mit Hilfe eines Joysticks bewegen konnten. Die Probanden wurden in der Szene an verschiedene Orte gebracht, um sich dort anhand der vorhandenen Objekte orientieren zu können. Anschließend mussten sie von einem anderen Punkt aus zum vorher gezeigten Zielpunkt zurückfinden. In einer Testphase wurden Objekte in der Nähe des Zielpunkts ausgeblendet. Während des Versuchs wurden die Blicke der Probanden aufgezeichnet und gemeinsam mit der Leistung, den Zielpunkt zu finden ausgewertet. Es wurde erwartet, dass Objekte, die für die Zielpunktfindung wichtig sind, durch eine erhöhte Fixationsanzahl von anderen Objekten zu unterscheiden sind. Des Weiteren sollte das Ausblenden von „wichtigen“ Objekten zu einer schlechteren Leistung führen als wenn „unwichtige“ Objekte, die durch eine geringere Fixationsanzahl gekennzeichnet sind, ausgeblendet werden.

### **C 1 Material und Methoden**

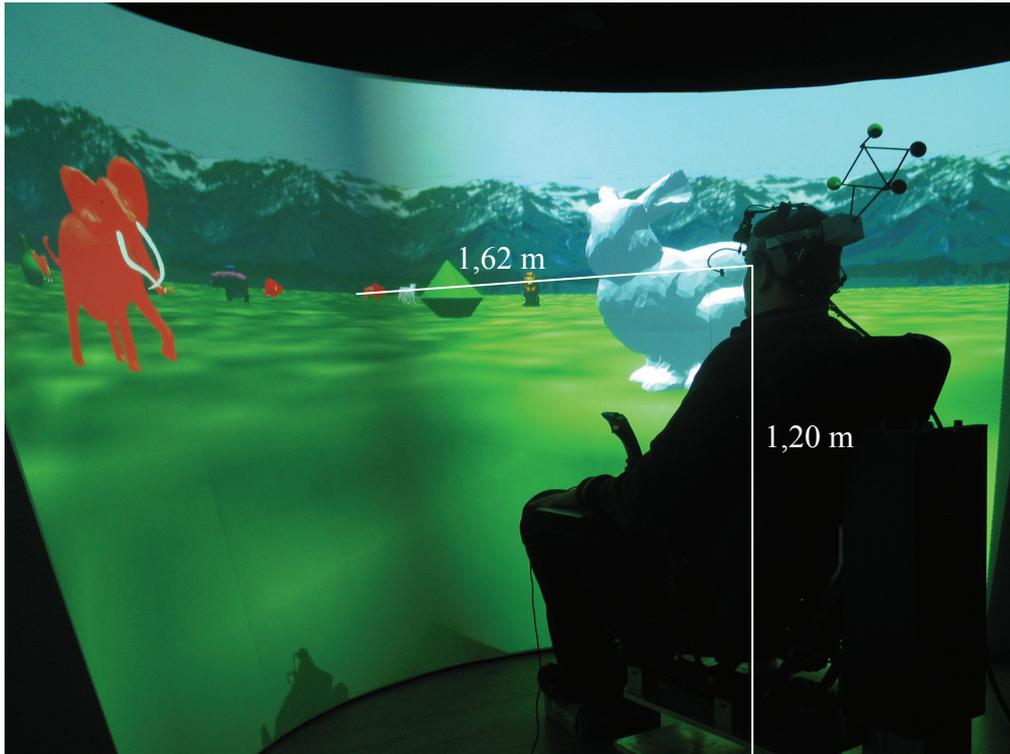
#### **C 1.1 Versuchspersonen**

Am Experiment nahmen 16 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 38 Jahren teil, die entweder keine Sehhilfe benötigten oder die Sehschwäche mit Hilfe von Kontaktlinsen ausgleichen konnten. Um eine möglichst homogene Gruppe zu haben und die Schwankungen in der Navigationsleistung zu begrenzen, wurden nur Männer untersucht. Es wurden nur die Messdaten von 11 Probanden ausgewertet, da sie im so genannten PTA-Test einen Wert von 20 oder höher erreichten (siehe C 1.5.4 PTA-Test). Die Versuchspersonen waren Studenten an verschiedenen Fakultäten der Universität Tübingen und wurden mit 8 Euro pro Stunde entlohnt. Für die Probanden bestand jederzeit die Möglichkeit den Versuch abubrechen.

#### **C 1.2 Aufbau**

##### **C 1.2.1 Leinwand**

Die Versuchumgebung bestand aus einer großen, gewölbten, schrägen, konischen Leinwand. Das Bild wurde von zwei Beamern (Sanyo Pro XtraX) über Kreuz auf die Leinwand projiziert. Die Versuchspersonen saßen mit einem Abstand von 1,62 Metern mittig vor der Leinwand. Die Sitzhöhe wurde individuell angepasst, so dass die Augenhöhe der Versuchspersonen bei 1,20 Meter lag. Dadurch deckte die Leinwand einen Bereich von  $\alpha = 150^\circ$  horizontal (Azimuth) und  $\beta = 68^\circ$  vertikal (Elevation) im Blickfeld der Versuchspersonen ab (Abb. 5). Im Vergleich dazu erstreckt sich das menschliche Sehfeld über einen Bereich von circa  $200^\circ \times 180^\circ$  (Hughes, 1977).



**Abb. 5: Versuchsaufbau:** Auf dem Bild sieht man eine Versuchsperson mit Eye- und Headtracker vor der Leinwand sitzen, auf die die virtuelle Umgebung mittels zweier Beamer projiziert wurde. Die Leinwand deckte ein Blickfeld von  $\alpha = 150^\circ$  horizontal und  $\beta = 68^\circ$  vertikal ab. Die Szene zeigt einen Ausschnitt aus dem Hauptprogramm, in dem die Versuchspersonen mit Hilfe der Objekte navigieren sollten.

### C 1.2.2 Eye- und Headtracking

Um die Augenbewegungen der Versuchspersonen zu messen wurde, ihnen ein Eyetrackerhelm (Modell 501) der Firma Applied Science Laboratories (ASL) aufgesetzt. Auf Höhe des Hinterkopfes wurde am Helm ein so genanntes „Headtracktarget“ befestigt, welches aus vier reflektierenden Kugeln in einer bestimmten räumlichen Anordnung bestand (Abb. 6). Die Kugeln wurden von vier im Raum verteilten Infrarotkameras der Firma advanced realtime tracking (A.R.T.) erfasst und die Position im Raum an den so genannten „Headtrackrechner“ gesandt (Abb. 8). Mit Hilfe dieser Daten war es möglich die Ausrichtung des Kopfes aufzuzeichnen.

Vorne am Eyetrackerhelm befand sich auf Stirnhöhe eine kleine Videokamera („Szenenkamera“), die auf die Leinwand gerichtet war und mit einem  $42^\circ \times 26^\circ$  Sichtbereich die Szene auf einem Monitor abbildete. Daneben waren eine nach unten gerichtete Infrarotkamera und eine Infrarotlichtquelle angebracht, die auf einen am Helm montierten, beweglichen Halbspiegel ausgerichtet wurden (Abb. 6). Dieser Halbspiegel reflektierte das Infrarotlicht auf das linke Auge der Versuchsperson. Die auf der Retina reflektierte Infrarotstrahlung trat wieder durch die Pupille aus, wurde am Spiegel reflektiert und von der Infrarotkamera aufgenommen. Dadurch ergab sich auf dem Kamerabild ein heller Kreis (Pupille), der von einem schwarzen Ring (Iris)

eingefasst war. Ein Teil des Lichts wurde auf der Cornea des Auges reflektiert, so dass sich ein kleiner heller Lichtpunkt ergab. Diese so genannte Corneareflexion wurde gemeinsam mit der Pupille vom Computerprogramm des Eyetrackers detektiert und als Augenposition in X- und Y-Koordinaten ausgegeben. Dazu wurden programmintern die Positionen der Pupille und der Corneareflexion miteinander verrechnet und mit den Referenzpunkten aus der Kalibrierung des Eyetrackers verglichen. Bei der Kalibrierung des Eyetrackers, die bei jeder Versuchsperson vor Versuchsbeginn durchgeführt wurde, werden vorgegebene Blickrichtungen mit den dabei gemessenen Augenpositionen verknüpft und Bezugspunkte definiert. Der genaue Ablauf der Kalibrierung ist in Abschnitt C 1.5.1 beschreiben.

Damit die Aufzeichnung der Augenbewegungen zuverlässig erfolgen konnte, wurden nur Versuchspersonen untersucht, die keine Brille trugen. Durch ein Brillenglas würde es zu einer zusätzlichen Reflexion am Glas kommen, die die Detektion der Corneareflexion erschweren oder gar verhindern könnte.

Parallel dazu wurden auf zwei Monitoren zum einen das Bild der Infrarotkamera, welche auf das Auge gerichtet war und zum anderen das Bild der Kamera, die die Szene abbildete dargestellt. Die Aufnahme der Szenenkamera wurde mit einem Fadenkreuz überlagert, welches der momentanen Blickrichtung der Versuchsperson entsprach. Das Fadenkreuz wurde in Echtzeit aus den Augenpositionsdaten berechnet und eingeblendet (Abb. 7).

Mit Hilfe eines angeschlossenen Videorecorders war es möglich, das Bild der Szenenkamera mit überlagertem Fadenkreuz aufzunehmen.

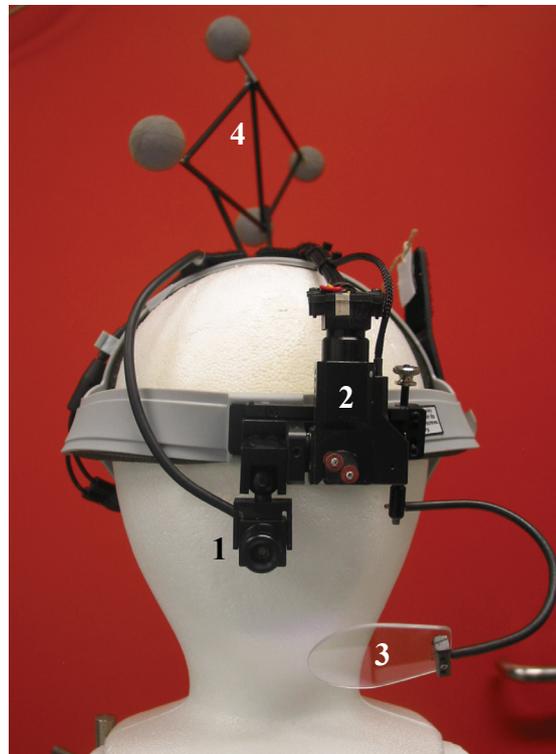
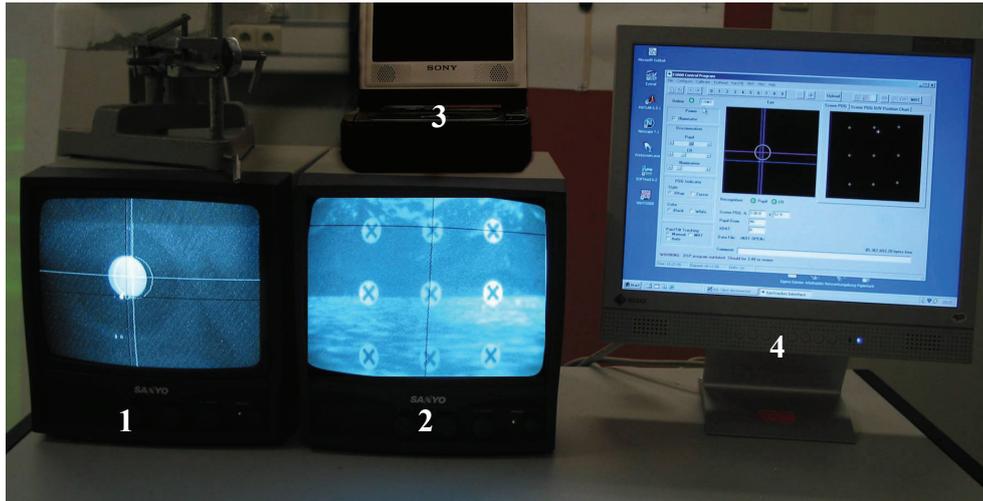


Abb. 6: Eyetrackerhelm mit Headtracktarget: 1 = Szenenkamera, 2 = Infrarotkamera, 3 = Halbspiegel, 4 = Headtracktarget



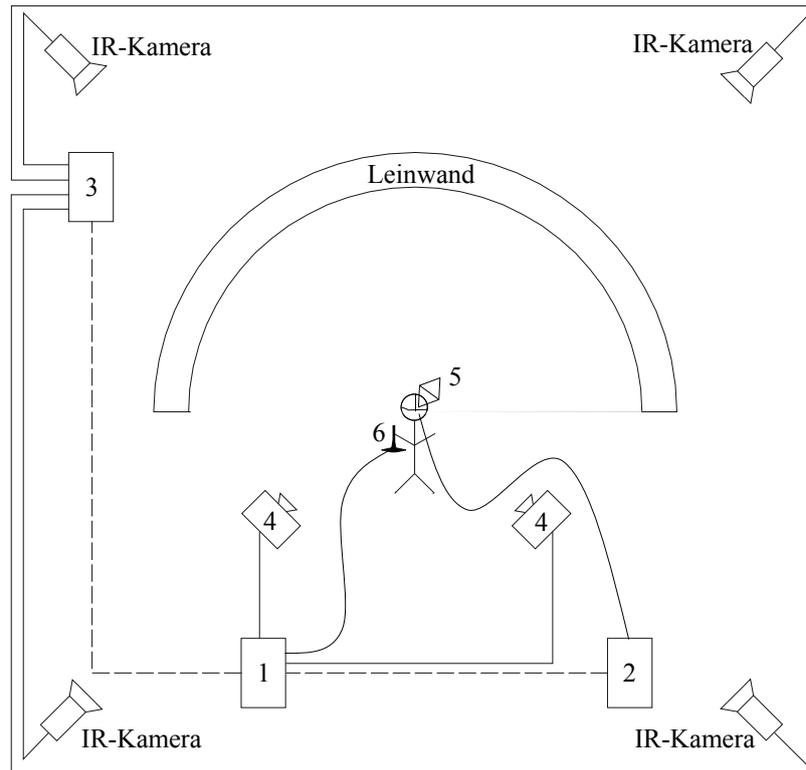
**Abb. 7: Eyetrackingrechner:** Links im Bild sind die beiden Monitore zu sehen, die das Bild der Infrarotkamera (1) und der Szenenkamera (2) zeigen. Auf diesen steht der Videorecorder für die Filmaufnahme (3). Ganz rechts ist der Monitor des Rechners zu sehen, auf dem das Programm für das Eyetracking läuft (4).

### C 1.3 Aufzeichnung

Die Messung der Daten wurde mit drei Computern realisiert. Auf einem Hauptrechner lief das Versuchsprogramm, welches die Darstellung, den Ablauf, die Kommunikation mit den anderen Rechnern und auch die Aufzeichnung der Daten beinhaltete (Abb. 8). An einen zweiten Rechner waren die vier Infrarotkameras angeschlossen. Das von der Firma mitgelieferte Programm übernahm die Kommunikation mit den Kameras und lieferte auf Anfrage vom Versuchsprogramm des Hauptrechners über ein Kabelnetzwerk die gemessenen Daten.

Der Eyetrackerhelm war über ein Steuergerät der Firma ASL an einen dritten Rechner angeschlossen, auf dem das firmeneigene Programm für das Eyetracking lief. Das Programm wurde zur Kalibrierung und Steuerung benutzt und übermittelte ebenfalls die Messdaten zur Aufzeichnung an den Hauptrechner (Abb. 7).

Während des Versuchs wurden sowohl die Augenbewegungen als auch die Kopfbewegungen der Probanden aufgezeichnet. Erstere wurden in Form von X- und Y-Koordinaten der Pupille sowie deren Durchmesser gemessen. Die Kopfbewegungen wurden als eine 3 x 3 Rotationsmatrix sowie als X-, Y- und Z-Koordinaten im Raum dargestellt. Zusätzlich wurden die Eulerwinkel aufgezeichnet, die bei der Auswertung jedoch nicht weiter berücksichtigt wurden. Die Position der Versuchsperson im virtuellen Raum wurde als X-, Y- und Z-Koordinaten festgehalten, ebenso wie die virtuelle Orientierungsrichtung in der Szene (das so genannte „Heading“). Des Weiteren wurden allgemeine Informationen wie Runde, Zielpunkt, Phase, Lauf, Gesamtzeit und Zeit der jeweiligen Phase aufgezeichnet (Erklärung der Begriffe siehe C 1.5.3 Hauptexperiment). Diese Daten wurden als Datei auf dem Hauptrechner gespeichert. Die Aufzeichnungsrate lag, idealer Weise, bei 60 Datenzeilen pro Sekunde, wurde aber zeitweise aufgrund der hohen Recherauslastung unterschritten und lag im Mittel bei 57 Zeilen pro Sekunde. Mit einem analog angeschlossenen Videoaufzeichnungsgerät (Sony VideoWalkman GV-800E) wurde bei zwei Versuchspersonen das Bild des Szenenmonitors mit überlagertem Fadenkreuz auf eine Videokassette aufgenommen.



**Abb. 8: Versuchsaufbau:** Der Hauptrechner (1) bekam sowohl Messdaten vom Rechner, der die Augenbewegungen maß (2) als auch vom Rechner, an den die Infrarotkameras angeschlossen waren (3), um das Headtracktarget (5) zu erfassen. Gleichzeitig steuerte er den Ablauf des Experimentes, die Darstellung über die Beamer (4) und die Steuerungseingaben des Joysticks (6), den die Versuchsperson zur Bewegung in der Welt verwendete.

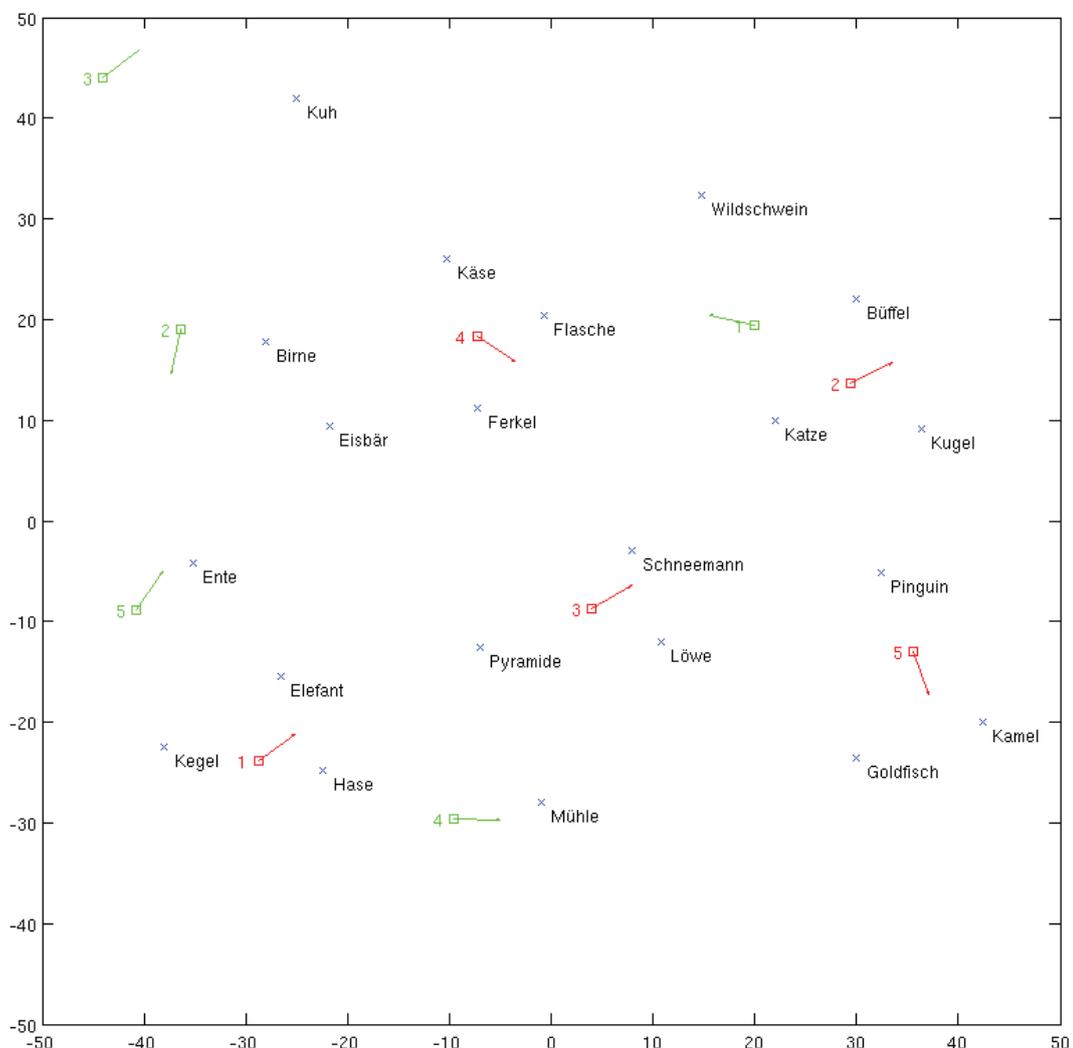
### **C 1.4 Die virtuelle Umgebung**

Die virtuelle Umgebung, in der die Versuchspersonen navigieren sollten, wurde mit dem Programm „MultiGen Creator“ der Firma MultiGen-Paradigm erstellt. Diese Umgebung bestand aus einer großen kreisförmigen Grasfläche, die in einem sich wiederholenden Bergszenario eingefasst war. Weder die Boden- noch die Wandfläche lieferten genug Informationen, um sich daran orientieren zu können. Innerhalb dieser Arena befanden sich 21 verschiedene dreidimensionale Objekte, die sich sowohl in ihrer Farbgebung als auch in ihrer Form deutlich voneinander unterschieden. Es handelte sich dabei um die ersten 21 Objekte, die auch in der Lernphase des Salienztests verwendet wurden und beinhaltete sowohl geometrische Formen wie z.B. eine Kugel, einen Zylinder oder eine Pyramide als auch Tiermodelle wie einen Löwen, eine Kuh oder einen Pinguin. Die Objekte wurden in der Umgebung frei verteilt, wobei berücksichtigt wurde, dass möglichst keine Anhäufungen von Objekten mit ähnlicher Farbe oder Form an einem Ort entstanden. Die Objekte wurden auf eine einheitliche Größe gebracht, so dass sie bei gleichem Betrachtungsabstand in etwa die gleiche Fläche des Sichtfeldes ausfüllten. Zwischen diese 21 Objekte wurden 5 Ziel- und 5 Startpunkte platziert, welche die Versuchspersonen finden sollten bzw. an denen sie starteten (Abb. 9 und Abb. 10).

Diese Punkte waren für die Probanden nicht extra gekennzeichnet und konnten nur durch die Konfiguration der umgebenden Objekte erschlossen werden.

Bei der Verteilung der Objekte wurde darauf geachtet, dass in der Nähe jedes Zielpunkts ein Objekt stand, an das sich die Versuchsperson des Salienztests gut erinnern konnten.

Die Zielpunkte, die es zu finden galt, wurden dabei so verteilt, dass jeder von ihnen 3 Objekte in direkter Nachbarschaft hatte. Insgesamt befanden sich 4 der Zielpunkte am Rand und einer in der Mitte der Versuchsarena. Die Startpunkte wurden so gewählt, dass die Versuchsperson auf dem Weg zum entsprechenden Zielpunkt mindestens die Hälfte der Ausdehnung der Versuchsarena zu durchlaufen hatte. Die Initialblickrichtung in der virtuellen Umgebung an den Start- und Zielpunkten unterschied sich je nach Start- bzw. Zielpunkt, so dass an manchen Punkten viele Objekte (zum Zentrum der Arena hin), bei anderen wenig Objekte (seitlich zum Zentrum / vom Zentrum weg) zu sehen waren.



**Abb. 9: Übersichtskarte der Versuchsumgebung: Die blauen Kreuze symbolisieren die verschiedenen Objekte, die grünen Quadrate die Startpunkte, die roten Quadrate die Zielpunkte. Der jeweils rote bzw. grüne Strich deutet die Initialblickrichtung der Versuchsperson an diesem Punkt an. Die Zahlen 1 bis 5 stehen für die zusammengehörenden Start- und Zielpunkte. Die Einheiten am Rand geben die Länge und Breite der Versuchsumgebung in Metern an.**



Anschließend wurde für die Kalibrierung des Eyetrackers ein 3 mal 3 Muster aus schwarzen Kreuzen auf gelbem Grund vor der Hintergrundszene eingeblendet (Abb. 7, Bild der Szenenkamera (2)). Mit Hilfe des Kamerabildes, das die Szene abbildete, wurden die Positionen der Kreuze manuell in das Programm des Eyetrackers übertragen und anschließend als Referenzpunkte verwendet. Die Versuchsperson sollte nun der Reihe nach die Kreuze auf der Leinwand fixieren und bei jeder Fixation wurde die Augenposition im Programm aufgezeichnet. Dadurch wurden die gemessenen Pupillen- und Corneareflexionskoordinaten mit den Referenzpunkten verknüpft, so dass daraus die Blickrichtungen der Versuchsperson während des Experiments berechnet werden konnte. Es folgte eine abschließende Prüfung der Kalibrierung, indem die Versuchsperson nochmals die Kreuze fixieren sollte und auf dem Monitor visuell die Übereinstimmung überprüft wurde.

Die Nullposition des Headtrackers bestimmte zusammen mit dem Fixationskreuz auf der Leinwand, das vor jeder Orientierungsphase eingeblendet wurde, den Nullvektor, der waagrecht von den Augen auf die Mitte der Leinwand gerichtet war (siehe C 1.6 Auswertung). Ausgehend von diesem Nullvektor wurden die Blicke der Versuchsperson in Winkeln in horizontaler und vertikaler Richtung angegeben.

### **C 1.5.2 Übungsgelände**

Vor dem Hauptversuch sollten sich die Versuchspersonen mit der Steuerung vertraut machen. Dazu wurden sie in ein virtuelles Übungsgelände gebracht und instruiert sich mit Hilfe des angeschlossenen Joysticks in der virtuellen Umgebung zu bewegen. Das Übungsgelände enthielt wie die Umgebung des Hauptexperimentes dieselbe Bodentextur und war von demselben Bergpanorama eingefasst. Zur Orientierung auf dem Übungsgelände standen ein Baum, ein roter Torbogen und mehrere graue Spielfiguren als Objekte zur Verfügung, die später im Hauptexperiment nicht wieder verwendet wurden. Dies diente als Vorkehrung, damit den Probanden im Hauptexperiment keine bereits bekannten Objekte gezeigt werden, auf die sie dann möglicherweise anders reagieren als auf die unbekanntes.

Es war den Probanden möglich sich vorwärts, rückwärts und seitwärts zu bewegen sowie sich in der horizontalen Ebene um sich selbst zu drehen. Die Bewegungen nach vorne und hinten, sowie die Drehung wurden durch ein Auslenken des Joystickgriffs erreicht. Für die Seitwärtsbewegung mussten auf der Bodenplatte des Joysticks zwei Tasten gedrückt werden, die je nach Richtung links beziehungsweise rechts angebracht waren. Die Versuchspersonen wurden angeleitet einen Weg, ausgehend vom Baum über mehrere Spielfiguren hin zum Tor zu beschreiten, sich dort umzudrehen und denselben Weg wieder zurück zu laufen. Anschließend sollten sie sich ohne Vorgaben frei bewegen, um sich eigenständig mit den Funktionen des Joysticks vertraut zu machen. Dieser Übungsabschnitt dauerte so lange bis die Versuchsperson der Meinung war, dass sie mit der Steuerung zurecht komme. Während des Aufenthalts auf dem Übungsgelände wurde darauf geachtet, dass jede Bewegung mindestens einmal ausgeführt wurde.

### C 1.5.3 Hauptexperiment

Das Hauptexperiment gliederte sich in Orientierungsphasen (Kapitel C 1.5.3.1) und Homingphasen (Kapitel C 1.5.3.2), wobei sich die Versuchsperson in ersterer an einem Zielpunkt befand und sich orientieren sollte, um anschließend in der Homingphase von einem Startpunkt aus zum vorher gezeigten Zielpunkt zu laufen.

In der virtuellen Umgebung des Hauptexperimentes gab es 5 verschiedene Zielpunkte und jeweils einen zugehörigen Startpunkt. Zu Beginn jedes Start-Ziellaufs wurde die Szene ausgeblendet und die Versuchsperson bekam vor einem grauen Hintergrund ein Schild mit der Aufschrift „Bitte fixieren Sie das Kreuz“ gezeigt. Nach einem Tastendruck auf der Tastatur durch den Experimentator verschwand das Schild und für drei Sekunden erschien in der Mitte der Leinwand ein schwarzes Fixationskreuz auf weißem Grund, welches von der Versuchsperson die ganze Zeit über fixiert werden sollte. Das Fixationskreuz diente zusammen mit der Nullposition des Headtrackers zur Berechnung des Nullvektors. Zudem begann durch das Kreuz jede Versuchsperson jeden Lauf mit dem Blick in die Mitte der Leinwand.

Jeder der 5 Zielpunkte wurde dreimal in pseudorandomisierter Reihenfolge angelaufen (= 3 Runden), insgesamt also 15 Start-Zielläufe pro Versuchsperson, wobei sich jeder Lauf wie oben beschrieben in eine Orientierungsphase und eine Homingphase gliederte (Tab. 2). Die Randomisierung war wichtig, um mögliche Auswirkungen eines Zielpunktes nicht durch einen Lerneffekt zu überdecken. Es gab dabei drei Gruppenbausteine, denen unterschiedliche Zielpunktfolgen zugeordnet waren. Für jede Versuchsperson wurde die Reihenfolge der Bausteine 1 bis 3 willkürlich gewählt und somit auch die Abfolge der Zielpunkte (Tab. 3). Insgesamt gab es drei Kombinationsmöglichkeiten, wobei darauf geachtet wurde, dass jede Kombination gleich häufig verwendet wurde.

Phase	Training		Test	
	Runde 1	Runde 2	Runde 2	Runde 3
Orientierung	Ziel 1-5	Ziel 1-5	Ziel 1-5	Ziel 1-5
Homing	Start-Ziel 1-5	Start-Ziel 1-5	Start-Ziel 1-5	Start-Ziel 1-5

**Tab. 2: Übersicht über den Versuchsablauf: Die Trainingsphase bestand aus einer Runde mit insgesamt fünf Start-Zielläufen, die Testphase enthielt zwei Runden mit zehn Läufen. In Runde 3 wurde vor jeder Homingphase eines der umstehenden Objekte um den Zielpunkt ausgeblendet. Für jeden Lauf gab es einen Start- und einen Zielpunkt. In der Orientierungsphase standen die Versuchspersonen am Zielpunkt um sich umzuschauen, in der Homingphase sollten sie vom Start- zum Zielpunkt laufen.**

Die erste Runde (entspricht 5 Zielpunkte) wurden als Training benutzt, damit die Versuchspersonen sich mit der Aufgabenstellung und der Umgebung vertraut machen konnten. Anschließend begann die Testphase (entspricht 10 Zielpunkte). In Runde 2 hatten die Versuchspersonen dieselben Bedingungen wie in Runde 1. In der dritten Runde wurde zu Beginn jeder Homingphase eines von den drei umstehenden Objekten um den jeweiligen Zielpunkt ausgeblendet. Dabei wurde darauf geachtet, dass das auszublendende Objekt während der Initialblickrichtung der Orientierungsphase auf der Leinwand und somit im Blickfeld der Versuchsperson

lag. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass auch Versuchsperson, die sich während der Orientierungsphase nicht drehen, das Objekt prinzipiell hätten sehen können. Das Ausblenden fand immer während des Transportes vom Ziel- zum Startpunkt statt, so dass die Versuchspersonen das Ausblenden nicht sehen konnten. Am Ende des Versuchs wurde den Versuchspersonen ein Fragebogen ausgehändigt, in dem sie die Schwierigkeit des Versuchs beurteilen sollten, nach Besonderheiten am Ablauf gefragt wurden, sowie ob sie eine besondere Strategie zur Lösung der Aufgabe verfolgt hatten.

<b>Gruppenbaustein</b>	<b>Zielpunktfolge</b>
1	1 2 3 4 5
2	3 1 5 2 4
3	5 3 2 1 4

**Tab. 3:** Übersicht über die Zusammenstellung der Zielpunktfolgen: Für jede Versuchsperson wurde aus allen drei Bausteinen eine Abfolge erstellt, die damit die Reihenfolge der Zielpunkte festlegte.

### ***C 1.5.3.1 Orientierungsphase***

In der Orientierungsphase wurde der Proband augenblicklich zu einem der 5 Zielpunkte transportiert und sollte sich „gut umschaun und an den Objekten orientieren“. Dazu konnte er sich auf der Stelle mit Hilfe des Joysticks um die eigene Achse drehen, ein Wegbewegen von diesem Standpunkt war nicht möglich. Diese Orientierungsphase hatte keine zeitliche Begrenzung. Nachdem sich die Probanden ausreichend orientiert hatten sollten sie einen Knopf am Joystick drücken, um mit dem Experiment fortzufahren.

### ***C 1.5.3.2 Homingphase***

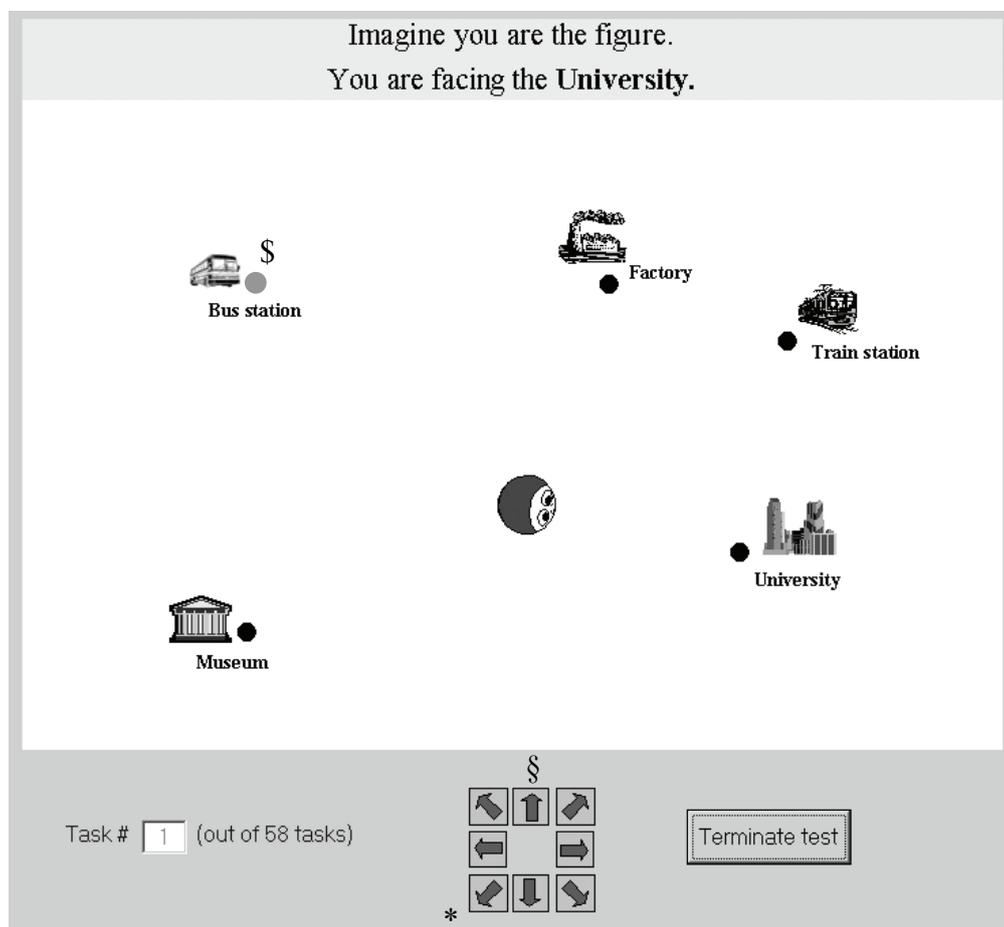
In der Homingphase wurde die Versuchsperson augenblicklich zum zugehörigen Startpunkt transportiert, von dem aus sie zum vorher gezeigten Zielpunkt „so exakt wie möglich und relativ zügig“ zurücklaufen sollte. Wenn die Versuchsperson der Meinung war den Zielpunkt gefunden zu haben, sollte sie wieder auf den Joystickknopf drücken. Dadurch war dieser Lauf abgeschlossen und es folgte der nächste mit einem neuen Zielpunkt-Startpunkt-Paar. Auch in der Homingphase gab es keine Zeitbegrenzung, allerdings wurde der Proband im Bedarfsfall darauf hingewiesen die Aufgabe ein wenig zügiger beziehungsweise im umgekehrten Fall exakter durchzuführen.

## **C 1.5.4 PTA-Test**

Nach dem Versuch wurde mit den Versuchspersonen ein so genannter „Perspective Taking Ability“-Test (PTA-Test) der Firma MM Virtual Design LCC durchgeführt. Hierbei handelte es sich um einen Test, der die Fähigkeit zur Orientierung im Raum misst (Kozhevnikov, Motes, Rasch, Blajenkova, 2006). Die Versuchsperson bekam auf einem Monitor ein Bedienungsfeld gezeigt, über dem sich verschiedene Orte,

symbolisiert durch Bilder und der entsprechenden Bezeichnung, in einer räumlichen Anordnung befanden. Innerhalb dieser Anordnung war auch eine stilisierte Figur zu sehen, die in eine bestimmte Richtung orientiert war. Die Versuchsperson sollte sich vorstellen, sie sei die Figur und blicke entsprechend ihrer Ausrichtung auf einen der Orte. Nach kurzer Zeit fing einer der Orte an zu blinken und der Proband sollte mit Hilfe von 8 Pfeiltasten auf dem Bedienungsfeld möglichst zügig angeben, in welcher Richtung sich der blinkende Ort zu ihm befand. Dabei musste die Versuchsperson berücksichtigen, dass die Pfeiltaste, die auf dem Monitor nach oben zeigte, der Blickrichtung der Figur entsprach (Abb. 11).

Der Test beinhaltete 58 dieser Aufgaben und dauerte je nach Versuchsperson etwa 10 Minuten. Am Ende wurde ein Wert ausgegeben, der sich aus der Dauer bis zum Tastendruck und den Fehlern bei der Richtungsangabe berechnete. Ab einem Wert von 20 bescheinigt das Programm dem Proband eine gute Orientierungsleistung. Die Messdaten der Versuchspersonen, die unter diesem Wert lagen wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt.



**Abb. 11: Aufgabe aus dem PTA-Test: Die Figur blickt in Richtung der Universität. In diesem Beispiel blinkte der Punkt, der die „Bus station“ markiert, rot auf (\$) und gab dadurch das Ziel an. Auf dem Bedienungsfeld entspricht der Pfeil nach oben (§) der Blickrichtung der Figur. Die richtige Antwort wäre in diesem Fall der Pfeil links-unten (\*).**

## **C 1.6 Auswertung**

Die Datenauswertung erfolgte in mehreren Stufen. Zuerst wurde die aufgezeichnete Rohdatendatei jeder Versuchsperson in Matlab (The MathWorks) entsprechend der Runde, Zielpunkt und Phase im Versuch in 30 kleinere Teile zerlegt (3 Runden x 5 Zielpunkte x 2 Phasen). Anschließend teilt sich die Auswertung in zwei Bereiche: zum einen die Untersuchung der Augenbewegungen und zum anderen die Bewegung der Versuchspersonen in der virtuellen Welt.

### **C 1.6.1 Bewegung in der virtuellen Welt**

Um die Bewegungen der Versuchspersonen auswerten zu können, wurden die X- und Y-Koordinaten sowie die Orientierungsrichtung der Probanden in der virtuellen Welt herangezogen. Für die Bestimmung des Endpunktes wurde die letzte Position der Versuchsperson beim Drücken des Joystickknopfes herangezogen. Ausgehend von diesen Koordinaten wurde der Abstand zum Zielpunkt in Metern berechnet. Dieser Distanz wurde zur Bewertung der Versuchspersonen benutzt und wird im weiteren Text als „Homingfehler“ bezeichnet. Des Weiteren wurden die Laufwege der Versuchspersonen ausgewertet und in Form von Laufwegen (so genannten „Trajektorien“) dargestellt.

### **C 1.6.2 Augenbewegungen**

#### **C 1.6.2.1 Datenaufbereitung**

Für die Augenbewegungsanalyse wurde nach dem Zerlegen eine Aufbereitung der Daten durchgeführt. Dazu wurde das Matlabscript einer Studienarbeit (Mayer, 2005) verwendet und für dieses Experiment entsprechend erweitert, so dass sowohl die Daten des Headtrackers als auch die des Eyetrackers miteinander verrechnet werden können. Aus der Nullposition des Headtrackers und der Position des Fixationskreuzes auf der Leinwand wurde der so genannte „Nullvektor“ erstellt. Dieser Vektor läuft waagrecht von der Nasenwurzel der Versuchsperson auf die Mitte der Leinwand. Für die Berechnung des Nullvektors wurden die Messwerte während des Blicks auf das erste Fixationskreuz zu Beginn des Versuchs benutzt. Für die weitere Berechnung wurden die Raumkoordinaten des Headtrackers und die X- und Y-Koordinaten des Auges in insgesamt vier Winkel umgerechnet, die ausgehend vom Nullvektor, in horizontaler und vertikaler Richtung verliefen.

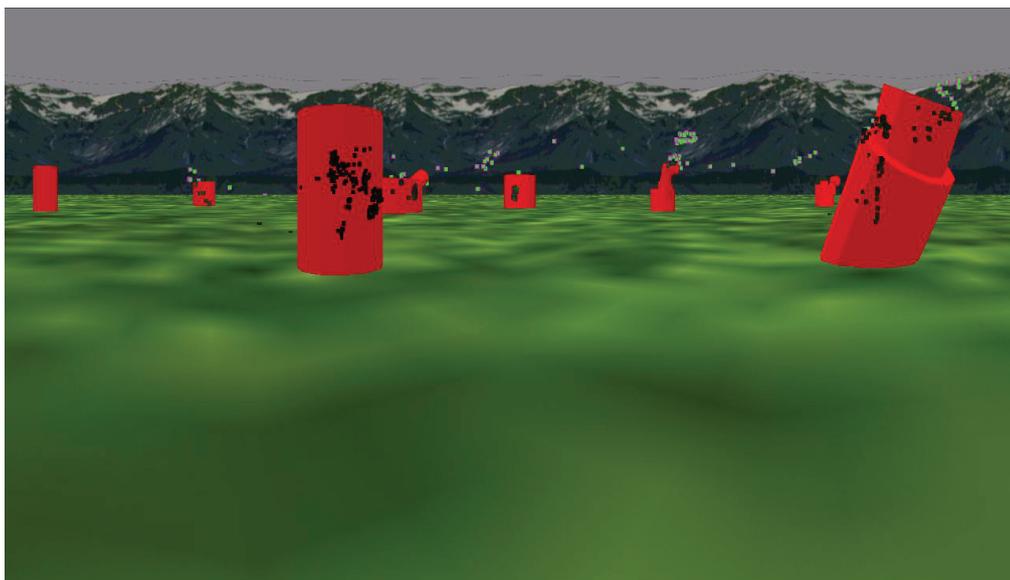
Die Winkel wurden anschließend miteinander verrechnet und in zwei Winkeln  $\alpha$  für Azimuth und  $\beta$  für Elevation als resultierender Blick auf die Leinwand dargestellt. Die Grenzen lagen hierbei für  $\alpha$  (Azimuth) bei  $\pm 75^\circ$  und für  $\beta$  (Elevation) bei  $+ 23^\circ$  (oben) und  $- 45^\circ$  (unten). Werte, die außerhalb dieser Grenzen lagen, zum Beispiel wenn die Versuchsperson auf den Joystick schaute, lagen auch außerhalb der Leinwand (Abb. 5).

Die Ausgabedatei nach der Datenaufbereitung enthielt neben den Winkeldaten auch die Position der Versuchsperson in der virtuellen Welt sowie deren Orientierungsrichtung und die Zeit. Messausfälle, bei denen der Eyetracker keine Daten lieferte weil entweder die Pupille oder die Corneareflexion nicht detektierbar

waren, z.B. wenn die Versuchsperson blinzelte, wurden gemeinsam mit den Fällen, bei denen die Versuchsperson über die Leinwand hinausschaute in einer zweiten Datei festgehalten. Diese Datei wurde zum Vergleich zwischen der automatischen und manuellen Auswertung benötigt (siehe E Manuelle und automatische Auswertung). Aufgrund von Problemen bei der Aufzeichnung wurde noch ein Interpolationsalgorithmus eingefügt, der bei Messausfällen des Headtrackers die Datenlücke schloss (für eine genaue Beschreibung siehe D 4 Fehlerbehebung).

### **C 1.6.2.2 Blickvektoranalyse**

Die Ausgabedatei nach der Datenaufbereitung wurde von einem Auswertungsprogramm, das ähnlich aufgebaut war wie das Versuchsprogramm, eingelesen. Dabei wurde der Ablauf des Versuchs, die Bewegungen und die Blicke der Versuchsperson in der Welt, anhand der eingelesenen Datei nochmals nachgestellt. Ein im Auswertungsprogramm enthaltener Programmteil wertete die Blicke der Versuchsperson aus, indem laufend Sichtstrahlen (Blickvektoren) anhand der Winkelinformationen auf die virtuelle Leinwand „geschossen“ und die Objekte, auf denen der Sichtstrahl auftraf, detektiert wurden (Abb. 12). Jedem Objekt war eine Nummer zugeordnet, über die es identifiziert werden konnte. Auch dieser Programmteil ging auf eine Studienarbeit zurück (Rothländer, 2006). Die Objekte wurden bei dieser Auswertung durch verschiedene Zylinder ersetzt, die der Form der Objekte angepasst waren. Dies hatte zum einen den Vorteil, dass dieser Teil der Auswertung schneller ablief, da die Belastung des Rechners aufgrund der simpleren Grafik geringer war. Zum anderen wurden dadurch auch Blicke registriert, die bei feinen Strukturen, wie zum Beispiel den Beinen der Tiere, möglicherweise nicht detektiert worden wären. Am Ende erhielt man eine Ausgabedatei, in der eine Abfolge von Objektnummern enthalten war. Zusätzlich wurden auch hier die Winkel, die Koordinaten der Versuchsperson und die Zeit ausgegeben.



**Abb. 12:** Szene aus dem automatischen Auswertungsprogramm: Die Objekte wurden durch Zylinder ersetzt. Das Programm zeichnete an den Punkten, an denen der Sichtstrahl auf einem Objekt auftraf, ein kleines Quadrat. Die unterschiedliche Farbgebung der Quadrate liegt in den unterschiedlichen Richtungen und Entfernungen zur Lichtquelle begründet.

Die Blickvektoren sagen jedoch noch nichts darüber aus, ob das Objekt an dieser Stelle auch wahrgenommen wurde, da sie auch Momente beinhalten, in denen Sakkaden ausgeführt wurden. Aus diesem Grund wurde im Anschluss eine Fixationsanalyse durchgeführt.

### ***C 1.6.2.3 Fixationsanalyse***

Die Fixationsanalyse erfolgte nach der Blickvektoranalyse und untersucht, ob ein Objekt von der Versuchsperson wirklich angeschaut, sprich fixiert wurde, oder ob der Blick im Zuge einer Sakkade nur darüber hinwegstreifte. Als Objektfixation wurden alle Fälle gewertet, in denen sich die Blickrichtung für mindestens 100 ms nicht mehr als 40 Grad pro Sekunde änderte (Manor, Gordon, 2003; Wörmann, 2000). Objekte, auf die einzelne Blickvektoren auftrafen, die aber nicht die oben beschriebenen Bedingungen erfüllten, wurden nicht als fixiertes Objekt gewertet.

### ***C 1.6.2.4 Salienzanalyse***

In der Salienzanalyse wurde den umstehenden Objekten um den jeweiligen Zielpunkt entsprechend ihrer Fixationsanzahl ein Rang zugewiesen. Bei kritischen Fällen, in denen zwei Objekte die gleiche Anzahl an Fixationen hatten, wurde zusätzlich noch die Fixationsdauer berücksichtigt, so dass das Objekt, welches länger betrachtet wurde den Vorrang bekam. Durch diese Methode konnte jedes der drei umstehenden Objekte in eine hoch-, mittel- und niedersaliente Klasse eingeteilt werden. Für diese Einteilung wurden die Fixationen der Orientierungsphasen aus Runde 1 und Runde 2 berücksichtigt. Die Fixationen während der Homingphase konnten für diese Einteilung nicht verwendet werden, da je nach Laufweg andere Objekte fixiert werden würden. Somit wäre keine eindeutige Aussage über die Salienz der Objekte am Zielpunkt möglich, da diese dann in Abhängigkeit des Startpunkts stehen würden. Auch die Fixationen in Runde 3 konnten nicht verwendet werden, da die Versuchspersonen möglicherweise ihr Blickverhalten ändern, nachdem sie das Verschwinden von Objekten bemerken.

Die Salienz sollte anhand eines natürlichen Blickverhaltens bestimmt werden, ohne dass eine Beeinflussung des Verhaltens durch das Ausblenden von Objekten hervorgerufen wird.

Nachdem für jede Versuchsperson den Objekten an jedem Zielpunkt ein Rang zugeordnet wurde, wurden die Homingfehler an den einzelnen Zielpunkten zu der Salienz des jeweils verschwundenen Objekts in Bezug gesetzt. Durch diesen Vergleich der Salienz des verschwundenen Objekts mit dem Fehler, den die Versuchspersonen machten, ließ sich eine Aussage über die Relevanz des Objekts für diese Aufgabenstellung treffen.

Weiterhin wurde noch die durchschnittliche Dauer der einzelnen Phasen untersucht, so wie die zurückgelegte Strecke, das Blickverhalten und die Verteilung der Messwerte.

### **C 1.6.3 Darstellung im Ergebnisteil**

Soweit nicht anders vermerkt, beruhen die Diagramme im Ergebnisteil auf den Mittelwerten über die Versuchspersonen.

Alle im Ergebnisteil dargestellten Fehlerbalken zeigen den Standardfehler (standard error of the mean, SEM), der sich aus der Standardabweichung (SD) geteilt durch die Quadratwurzel der Datenmenge berechnet.

Bei der statistischen Auswertung wurden nicht-parametrische Tests verwendet, da die Prüfung der Verteilung der Messwerte ergab, dass die Daten keiner Normalverteilung folgten. Für die Prüfung wurde die Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests verwendet.

Mit Hilfe des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests kann sowohl statistisch überprüft werden ob zwei Verteilungen von Stichproben übereinstimmen, als auch ob Stichproben einer bestimmten Verteilung folgen. Die Lilliefors-Modifikation wird verwendet, wenn keine vollständige Spezifikation der Verteilungsparameter gegeben ist. Des Weiteren lässt sie sich auch bei kleinerem Stichprobenumfang anwenden.

Für den Vergleich zwischen den Salienzgruppen wurde ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Dieser Test überprüft zwei unabhängige Verteilungen auf die Nullhypothese, die besagt, dass sich zwei Verteilungen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Der Test gibt einen p-Wert aus, der die Irrtumswahrscheinlichkeit darstellt, mit der die Nullhypothese abgelehnt wird.

Für den Vergleich zwischen zwei Runden wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test verwendet, da bei dieser Gegenüberstellung die Stichproben gepaart vorliegen. Der Test gibt ebenfalls einen p-Wert aus, der die Irrtumswahrscheinlichkeit darstellt, mit der die Nullhypothese abgelehnt wird.

Werte unter 0,05 gelten als signifikant und werden mit einem Stern (\*) gekennzeichnet. Ein p-Wert unter 0,01 wird mit zwei Sternen (\*\*), ein p-Wert unter 0,001 mit drei Sternen (\*\*\*) versehen.

## C 2 Ergebnisse und Diskussion

Alle Versuchspersonen waren in der Lage die geforderte Aufgabe zu lösen. Von fünf Versuchspersonen mussten die Daten jedoch verworfen werden, da entweder eine zu hohe Ausfallrate von über 16 % während der Aufzeichnung der Messwerte vorlag, die Versuchsperson andere Hilfsmittel zur Orientierung benutzte, der Eyetrackinghelm während des Versuchs verrutschte oder der Proband im PTA-Test schlecht abschnitt (siehe C 2.7 Ausschluss von Versuchspersonen). Von den verbleibenden elf Probanden konnten acht Läufe in der Testphase bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden (siehe C 2.8 Ausschluss einzelner Läufe). Insgesamt lagen 165 Endpunkte vor (11 Versuchspersonen x 3 Runden x 5 Zielpunkte). Abzüglich der 24 Endpunkte (8 Läufe x 3 Runden), die nicht verwendet werden konnten, beruhen die nun folgenden Ergebnisse auf den restlichen 141 Messdaten.

### C 2.1 Dauer der Orientierungs- und Homingphase

Die Versuchspersonen befanden sich in der ersten Runde für durchschnittlich 48,0 Sekunden in der Orientierungsphase. In Runde zwei waren sie für 31,3 Sekunden, in Runde drei für 35,5 Sekunden in der Orientierungsphase (Abb. 13). Für die Homingphase benötigten sie in Runde eins im Mittel 71,0 Sekunden, in Runde zwei 72,9 Sekunden und in der dritten Runde 83,2 Sekunden (Abb. 14). Insgesamt befanden sich die Versuchspersonen für durchschnittlich 28,5 Minuten in der Orientierungs- und Homingphase.

Die Versuchspersonen benötigten mehr Zeit, um die Aufgabe unter den erschwerten Bedingungen zu erfüllen. Nachdem den Probanden aufgefallen war, dass Objekte fehlten, versuchten sie diesen Verlust an Positionsinformationen auszugleichen, indem sie mehr Zeit in der Orientierungsphase verbrachten.

Es fällt auf, dass sowohl die durchschnittliche Anzahl der Fixationen (Abb. 27) als auch die durchschnittliche Anzahl der verschiedenen Objektfixationen (Abb. 28) von Runde 2 zu Runde 3 nur minimal zunimmt. Die durchschnittliche Gesamtfixationsdauer je Zielpunkt nimmt sogar ab (Abb. 29). In dieser zusätzlichen Zeit haben die Versuchspersonen also weder zusätzliche Objekte fixiert noch dieselben Objekte häufiger oder länger fixiert. Somit müssen die Probanden den Blick häufiger auf die Wiese oder den Hintergrund gerichtet haben. Dabei gibt es die Möglichkeit, dass sie entweder häufiger diese beiden Bereiche fixiert haben, um sich beispielsweise die Entfernung zwischen Objekten oder zwischen Objekten und dem eigenen Standpunkt einzuprägen oder die Probanden haben häufiger zwischen den Objekten hin und her geschaut, so dass eine größere Anzahl an Blickvektoren auf die Wiese oder den Hintergrund fielen, jedoch keine zusätzlichen Fixationen darauf erfolgten.

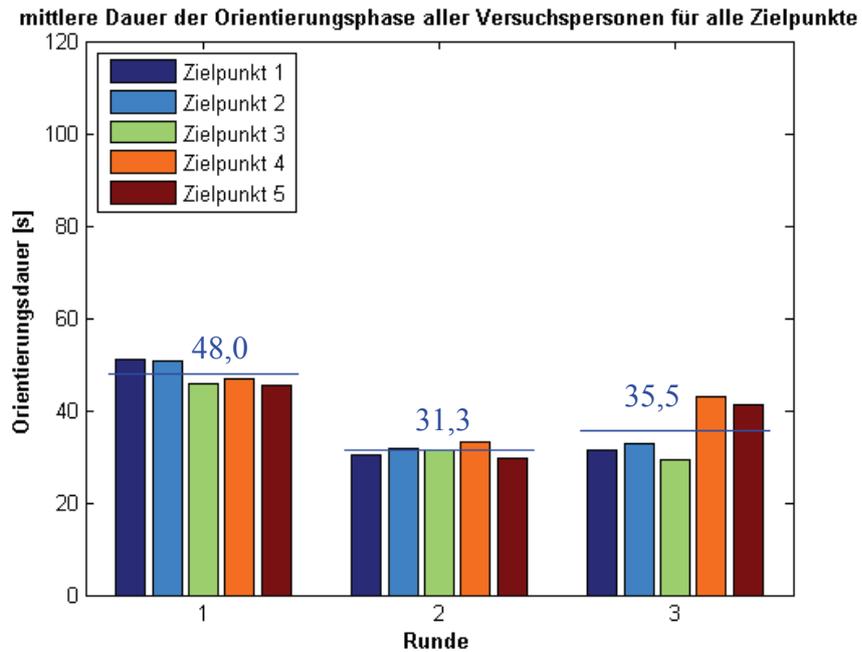


Abb. 13: Dauer der Orientierungsphase: Die Zeitdauer, in der sich die Probanden in der Orientierungsphase befanden, war in der ersten Runde am größten. Auf der X-Achse sind die einzelnen Runden, auf der Y-Achse die durchschnittliche Dauer der Phasen aufgetragen. Die einzelnen Balken entsprechen den fünf Zielpunkten, die blauen Linien und Zahlen geben den Mittelwert der Runde in Metern an.

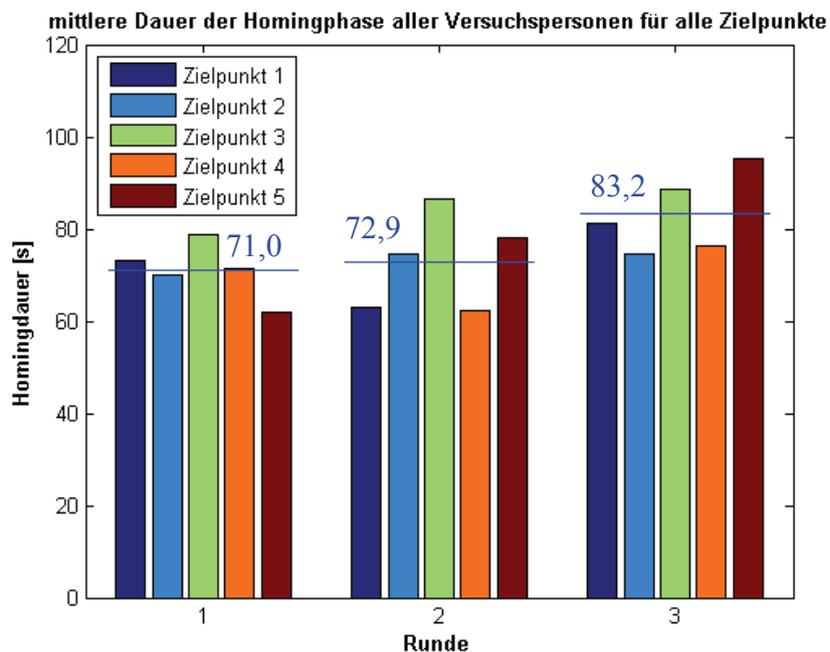
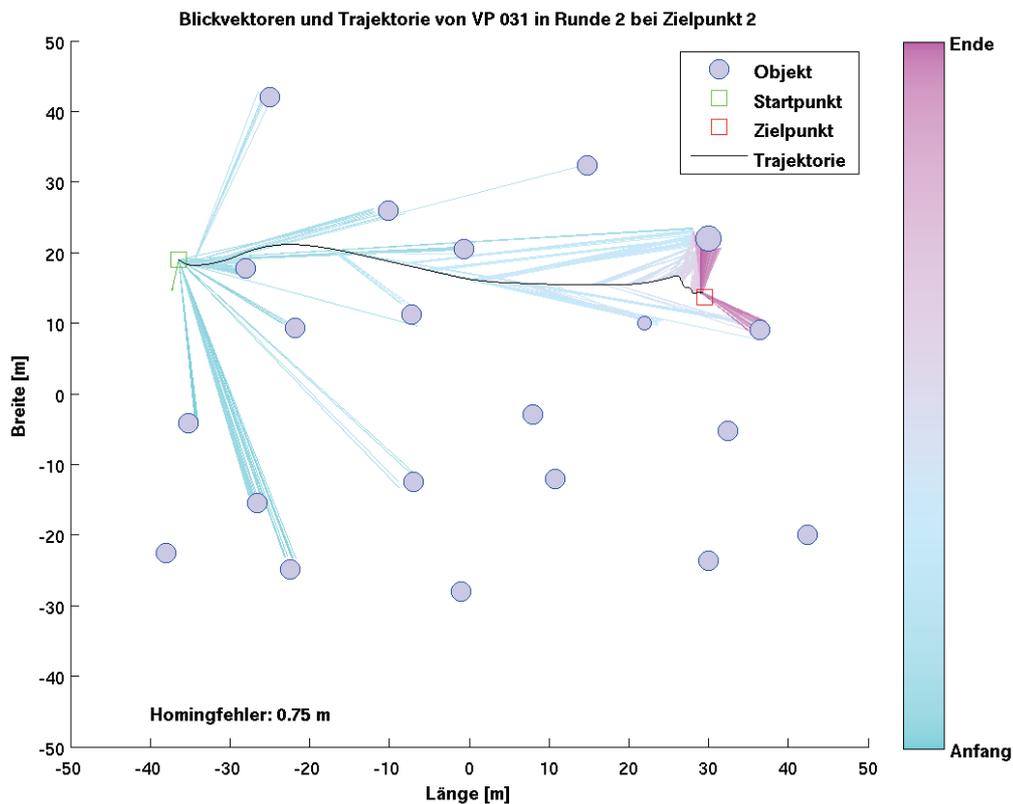


Abb. 14: Dauer der Homingphase: Die Zeitdauer, in der sich die Probanden in der Homingphase befanden, war in Runde drei am größten. Auf der X-Achse sind die einzelnen Runden, auf der Y-Achse die durchschnittliche Dauer der Phasen aufgetragen. Die einzelnen Balken entsprechen den fünf Zielpunkten, die blauen Linien und Zahlen geben den Mittelwert der Runde in Metern an.

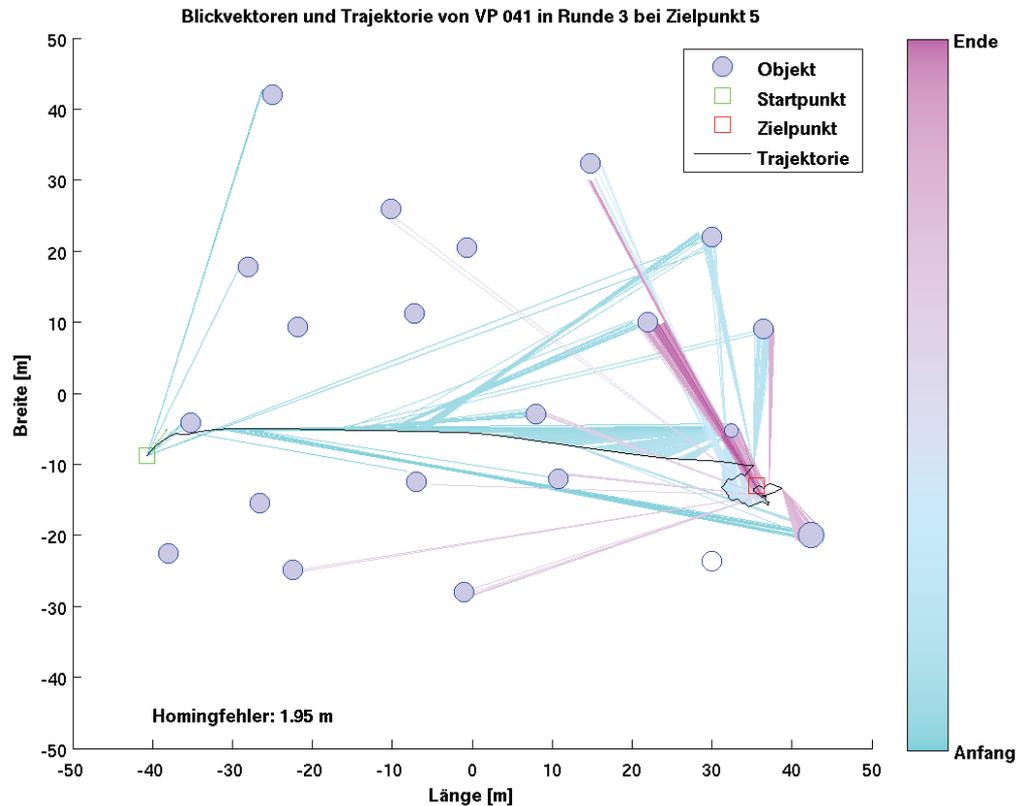
## C 2.2 Trajektorien

Die Betrachtung der Trajektorien der Versuchspersonen zeigte, dass je nach Versuchsperson, Runde und Zielpunkt verschiedene Wege gewählt wurden (siehe G Anhang). In Abb. 15 ist beispielhaft der Weg von Versuchsperson 031 in Runde 2 zum zweiten Zielpunkt dargestellt. Der Homingfehler betrug in diesem Lauf 0,75 Meter. Zusätzlich eingezeichnet sind die Blickvektoren auf die Objekte zum jeweiligen Zeitpunkt und Position während des Laufs. Die zeitliche Abfolge der Blickvektoren wird durch den Farbverlauf symbolisiert, wobei blau für Blickvektoren zu Beginn und lila für Blickvektoren am Ende des Laufes stehen.



**Abb. 15: Blickvektoren und Trajektorie: Homingphase von Versuchsperson 031 in Runde 2 bei Zielpunkt 2.** Die Trajektorie (schwarz) führt vom Startpunkt (grün) an den Objekten vorbei (blau) in die Nähe des Zielpunktes (rot). Der grüne Strich gibt die Initialblickrichtung in dieser Phase an. Der Abstand vom End- zum Zielpunkt betrug 0,75 m. Die blau-lila Linien stellen die Blickvektoren der Versuchsperson zum jeweiligen Zeitpunkt auf die Objekte dar. Blaue Linien entsprechen den Blickvektoren zu Beginn, lila Linien den Blickvektoren am Ende des Laufs. Die unterschiedliche Größe der drei Kreise um den roten Zielpunkt symbolisiert die Salienz der Objekte: groß = hochsalient, klein = niedersalient, mittel = mittelsalient. Auf der X- und Y-Achse ist die Länge und Breite der Versuchsumgebung in Metern angegeben.

Abb. 16 zeigt exemplarisch den Lauf von Versuchsperson 041 in Runde 3 an Zielpunkt 5. Am Platz des ausgeblendeten Objekts wurde ein leerer Kreis eingezeichnet. Die Versuchsperson lief zuerst geradlinig in Richtung der Umgebung um den Zielpunkt. In der Nähe des Zielpunktes bewegte sie sich kreisförmig um das Ziel herum, um am Ende mit einem Abstand von 1,95 Meter die Endposition zu markieren.

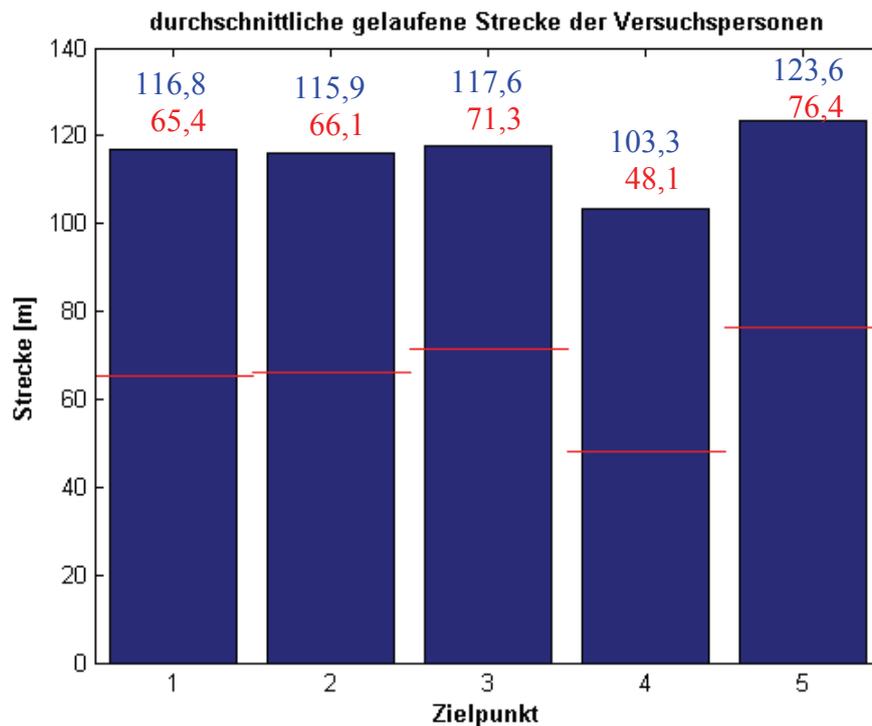


**Abb. 16: Blickvektoren und Trajektorie: Homingphase von Versuchsperson 041 in Runde 3 bei Zielpunkt 5.** Die Trajektorie (schwarz) führt vom Startpunkt (grün) an den Objekten vorbei (blau) in die Nähe des Zielpunktes (rot). Der grüne Strich gibt die Initialblickrichtung in dieser Phase an. Der Abstand vom End- zum Zielpunkt betrug 1,95 m. Die Versuchsperson bewegte sich in der Nähe des Zielpunktes kreisförmig umher. Die blau-lila Linien stellen die Blickvektoren der Versuchsperson zum jeweiligen Zeitpunkt auf die Objekte dar. Blaue Linien entsprechen den Blickvektoren zu Beginn, lila Linien den Blickvektoren am Ende des Laufs. Die unterschiedliche Größe der drei Kreise um den roten Zielpunkt symbolisiert die Salienz der Objekte: groß = hochsalient, klein = niedersalient, mittel = mittelsalient. Am Platz des ausgeblendeten Objekts ist ein leerer Kreis eingezeichnet. Auf der X- und Y-Achse ist die Länge und Breite der Versuchsumgebung in Metern angegeben.

Bei der Betrachtung der Trajektorien war zu erkennen, dass Versuchspersonen zum Teil schon nach der Hälfte der Wegstrecke nach dem Zielpunkt, beziehungsweise den Objekten, die in der Nähe des Zielpunktes standen, zu suchen begannen. Es war auch bei einigen Läufen eine häufige Positionsänderung in der Nähe des Zielpunktes zu beobachten. Jedoch gab es auch oft Läufe, in denen der Proband anscheinend „zielsicher“ und ohne Korrigieren der Position zum Zielpunkt lief. Beide Verhaltensweisen traten zum Teil bei denselben Versuchspersonen auf. Eine Auswirkung auf den Homingfehler schien dies nicht zu haben, da bei beiden Strategien geringe Positionsabweichungen vom Zielpunkt möglich waren. In wenigen Fällen waren die Trajektorien sehr lang und verliefen über einen größeren Bereich der virtuellen Umgebung. Die betroffenen Versuchspersonen äußerten dabei meist, dass sie ein Objekt vermissen und dieses zu suchen begannen. Zu allen oben angesprochenen Verhaltensweisen sind im Anhang Beispielbilder beigefügt.

### C 2.3 Laufstrecke

In Abb. 17 ist die durchschnittlich gelaufene Strecke aller Probanden in allen Runden auf die fünf Zielpunkte verteilt dargestellt. Die rote Linie und die roten Zahlen geben die kürzestmögliche Strecke vom jeweiligen Start- zum Zielpunkt an, die schwarzen Zahlen die durchschnittliche gelaufene Strecke aller Versuchspersonen. Bei Zielpunkt 4 lagen Start und Ziel näher beieinander als bei den anderen Punkten. Obwohl die benötigte Strecke an diesem Zielpunkt am kürzesten, war legten die Probanden hier mehr als den doppelten Weg zurück, im Gegensatz zu den anderen Zielpunkten.



**Abb. 17: Durchschnittliche gelaufene Strecke je Zielpunkt: Sowohl die Mindeststrecke (rote Linie) als auch die gelaufene Strecke an Zielpunkt 4 war kürzer als die der anderen Zielpunkte. Dabei war die „zuviel“ gelaufene Strecke hierbei am größten. Die roten Linien und Zahlen geben die kürzestmögliche Strecke vom jeweiligen Start- zum Zielpunkt in Metern an, die blauen Zahlen die durchschnittlich gelaufene Strecke. Auf der X-Achse sind die fünf Zielpunkte, auf der Y-Achse die Strecke in Metern aufgetragen.**

Die Versuchspersonen liefen im Schnitt eine Strecke von 115,5 Meter. Dabei lag das Mittel in Runde eins bei 114,0 Meter, in Runde zwei bei 109,1 Meter und in Runde drei bei 123,3 Meter (Abb. 18, blaue Linien). Die rote Linie gibt die kürzestmögliche Strecke von durchschnittlich 65,45 Meter pro Runde an. Während in Runde 1 und Runde 2 die Strecke bei Zielpunkt 4 (orangefarbiger Balken) deutlich kürzer war als die der anderen Zielpunkte, war dies in Runde 3 nicht mehr zu beobachten. Der Streckenzuwachs in Runde 3 an Zielpunkt 4 war somit in Bezug zu den anderen Zielpunkten dieser Runde größer. Die zurückgelegte Strecke schwankte je nach Versuchsperson zwischen 82,8 Meter und 192,2 Meter (Abb. 19), wobei es zwischen den einzelnen Läufen eines Probanden nur geringe Schwankungen gab. Die Versuchspersonen 044 und 045 traten mit ihrer Leistung die Zielpunkte zu finden jedoch nicht hervor.

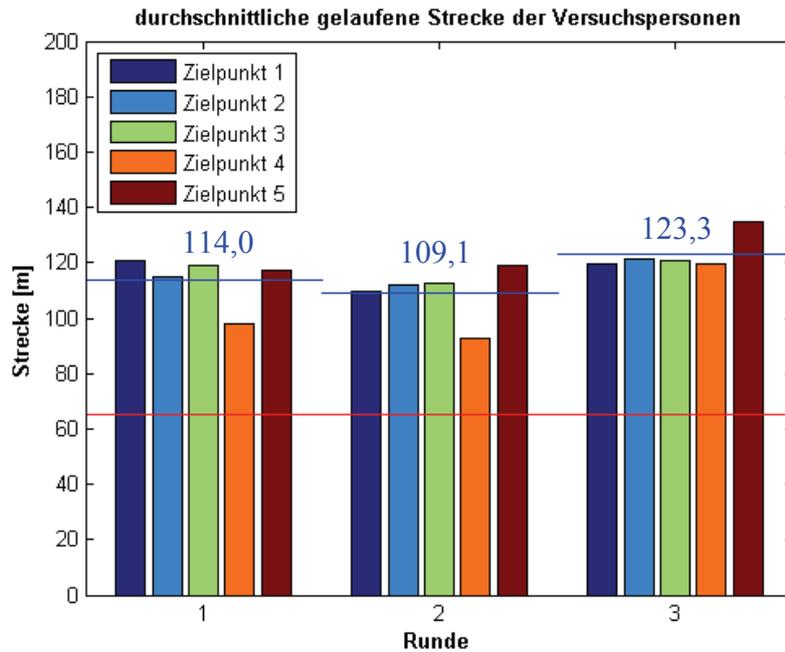


Abb. 18: Durchschnittliche gelaufene Strecke je Runde: Der zurückgelegte Weg war in Runde 2 am geringsten, in Runde 3 am größten. Die blauen Linien und Zahlen geben jeweils die mittlere gelaufene Strecke, die rote Linie die kürzestmögliche Strecke (65,45 m) je Runde an. Auf der X-Achse sind die fünf Zielpunkte, auf der Y-Achse die Strecke in Metern aufgetragen.

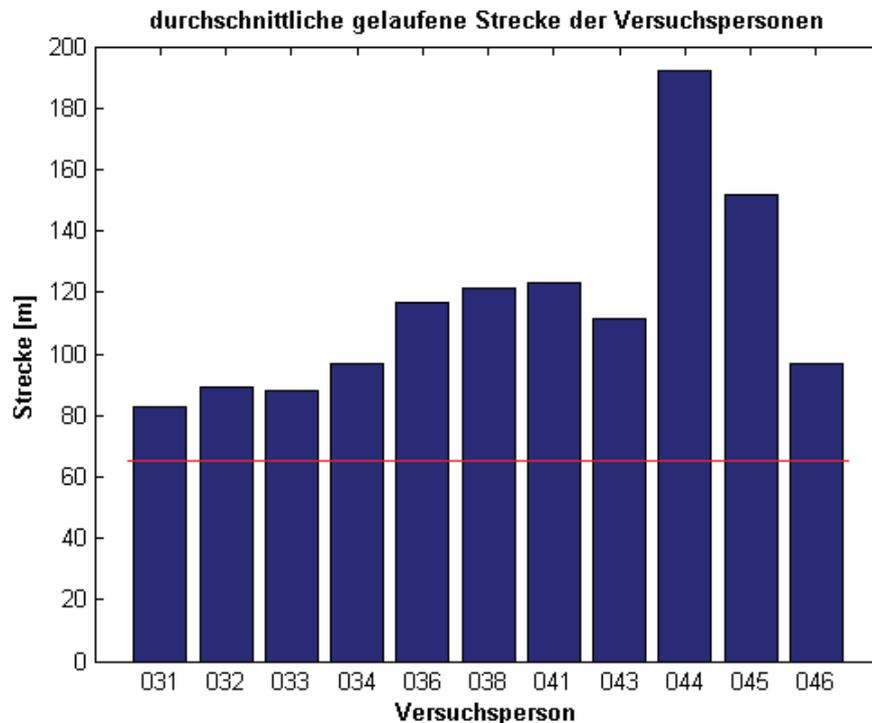
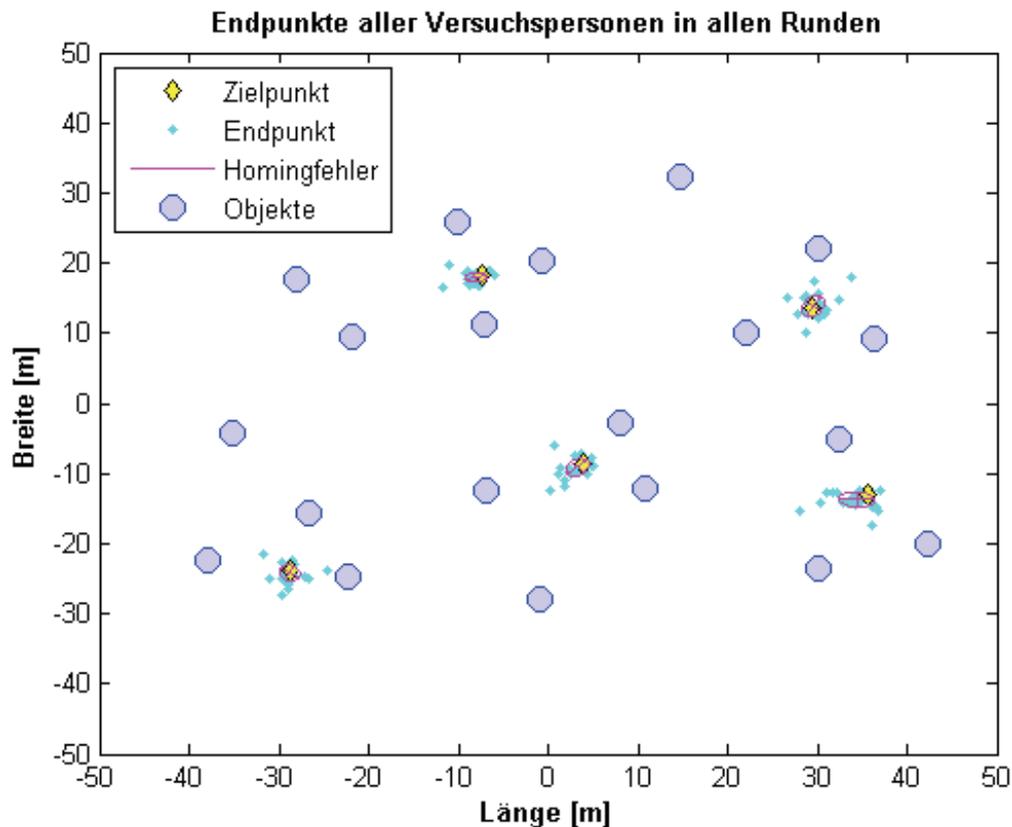


Abb. 19: Durchschnittliche gelaufene Strecke je Versuchsperson: Im Mittel legten die Probanden eine Strecke von 115,5 Meter zurück. Dabei schwankte die gelaufene Strecke je nach Versuchsperson. Die rote Linie gibt die kürzestmögliche Strecke an (65,45 m). Auf der X-Achse sind die Versuchspersonen, auf der Y-Achse die Strecke in Metern aufgetragen.

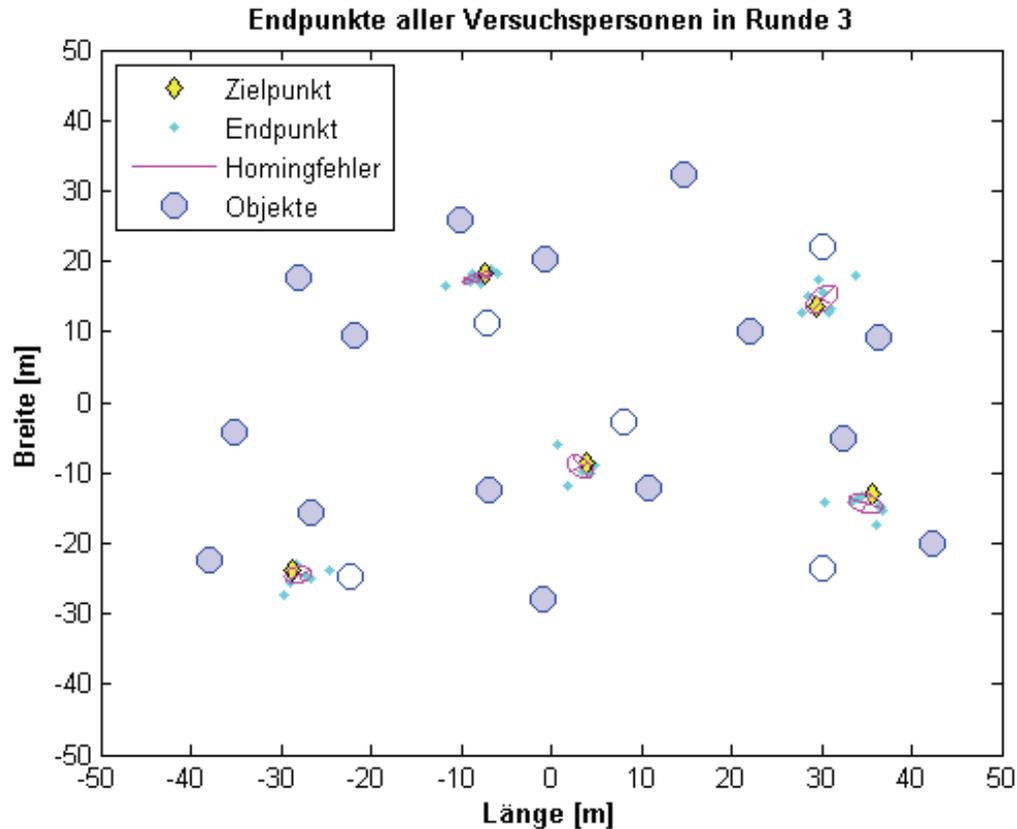
## C 2.4 Endpunkte

Die Endpunkte der Versuchspersonen streuten sich um den Zielpunkt (Abb. 20). Dargestellt sind hierbei die Endpositionen aus allen drei Runden. Die Schwerpunkte der eingezeichneten Ellipsen stellen jeweils den mittleren Endpunkt aller Versuchspersonen dar und berechneten sich aus dem Mittelwert der Endpunkte am entsprechenden Ziel. Die Ausmaße und die Ausrichtungen der Ellipsen berechneten sich aus der Kovarianzmatrix der Endpunkte. Der Großteil der Endpunkte der Probanden befand sich in der Nähe der Zielpunkte.



**Abb. 20: Endpositionen der Versuchspersonen bei allen Runden: Die Endpunkte streuten sich um den zu findenden Zielpunkt (gelb-schwarz). Die blauen Kreise symbolisieren die Objekte an ihrem jeweiligen Standpunkt. Auf den Achsen sind die Länge und Breite der virtuellen Umgebung in Metern aufgetragen.**

In Abb. 21 sind die Endpunkte der Versuchspersonen in der dritten Runde dargestellt. Auch hier streuten sich die gemessenen Endpunkte um den jeweiligen Zielpunkt. Die nicht ausgefüllten Kreise stellen die Orte dar, an denen die verschwundenen Objekte zuvor standen. Die Verschiebung der mittleren Endpunkte folgte keinem einheitlichen Muster. An den Zielpunkten 1, 2 und 5 war er leicht zur Position des verschwundenen Objekts hin, an Zielpunkt 3 vom Ort des verschwundenen Objekts weg verschoben. Am vierten Zielpunkt war er zur Seite versetzt. Diese Verschiebung stand auch nicht im Zusammenhang mit der Richtung, aus der die Probanden zum Zielpunkt liefen.

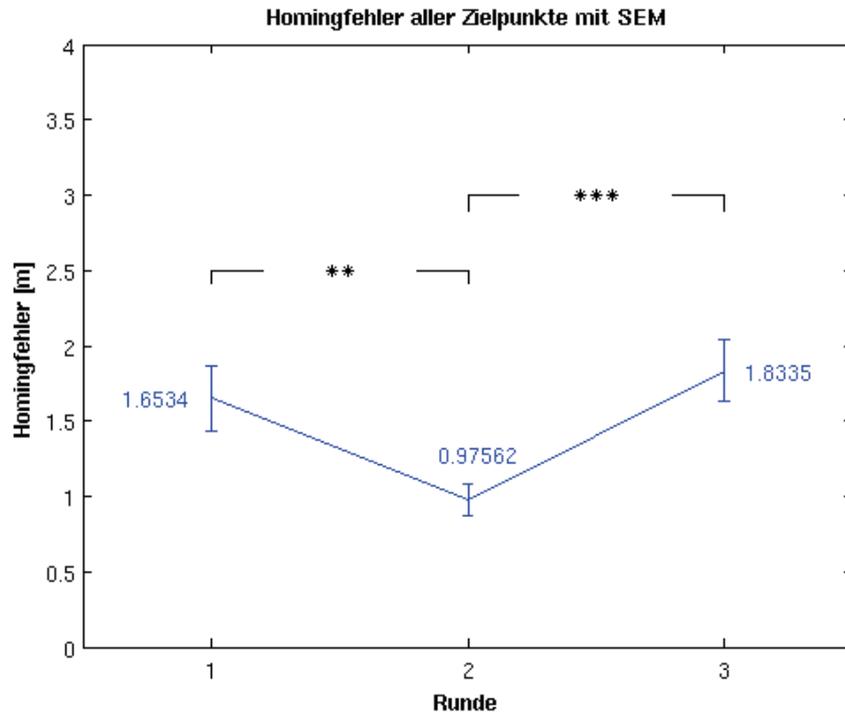


**Abb. 21: Endpositionen der Versuchspersonen in Runde 3: Die Endpunkte streuten sich um den Zielpunkt (schwarz-gelb). Die ausgefüllten blauen Kreise symbolisieren die Objekte an ihrer jeweiligen Position, die leeren Kreise die Positionen, an denen die ausgeblendeten Objekte standen. Auf den Achsen sind die Länge und Breite der virtuellen Umgebung in Metern aufgetragen.**

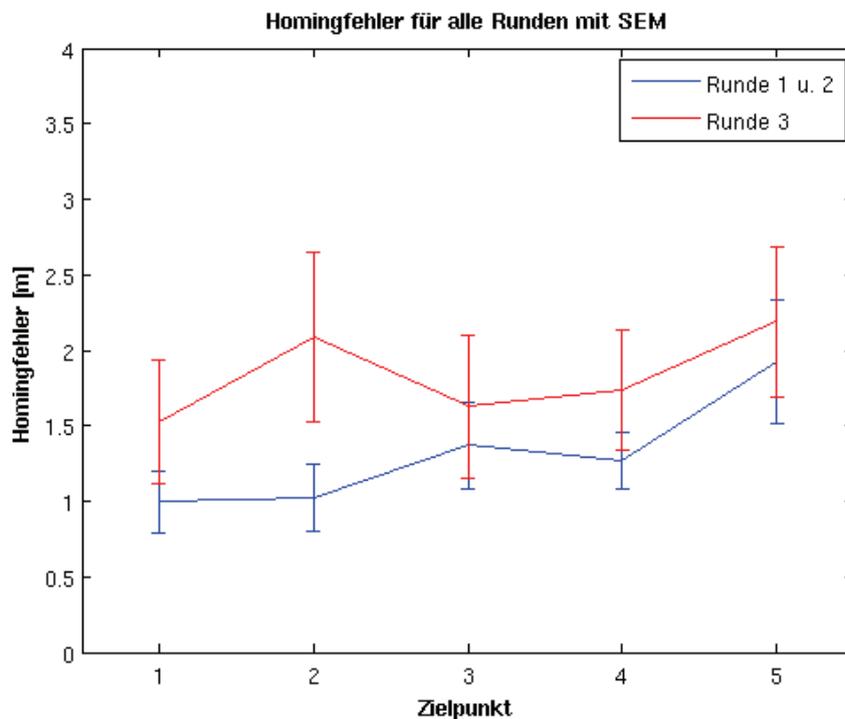
### **C 2.5 Homingfehler**

Der Abstand zwischen dem Zielpunkt und dem Endpunkt, an dem die Probanden den Zielpunkt vermuteten, lag in der ersten Runde im Mittel bei 1,64 Meter (Abb. 22). In der zweiten Runde nahm dieser Homingfehler auf 0,97 Meter ab. Diese Abnahme des Fehlers war signifikant (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test:  $p = 0,0095$ ). In Runde 3 verschlechterten sich die Versuchspersonen; der Homingfehler stieg auf 1,83 Meter an. Diese Änderung von Runde 2 zu Runde 3 war hochsignifikant ( $p < 0,001$ ). Die Abnahme des durchschnittlichen Homingfehlers von Runde 1 zu Runde 2 ist durch einen Lerneffekt bei den Versuchspersonen zu erklären. Sie werden im Laufe des Experiments zum einen mit der Situation und zum anderen mit den Objekten vertrauter, so dass es ihnen möglich war, schneller und exakter zum Zielpunkt zu laufen. Wenn bereits in Runde 2 Objekte ausgeblendet worden wären, wäre es zu einer Überlagerung der beiden Effekte gekommen und eine Differenzierung wäre nicht möglich gewesen.

Die Leistung der Versuchspersonen schwankte an fünf Zielpunkten, sowohl in der Trainingsphase als auch in der Testphase, leicht (Abb. 23). Der Homingfehler lag in der dritten Runde durchweg über dem von Runde 1 und 2. Die Fehler wurden hierbei für Runde 1 und Runde 2 gemittelt.

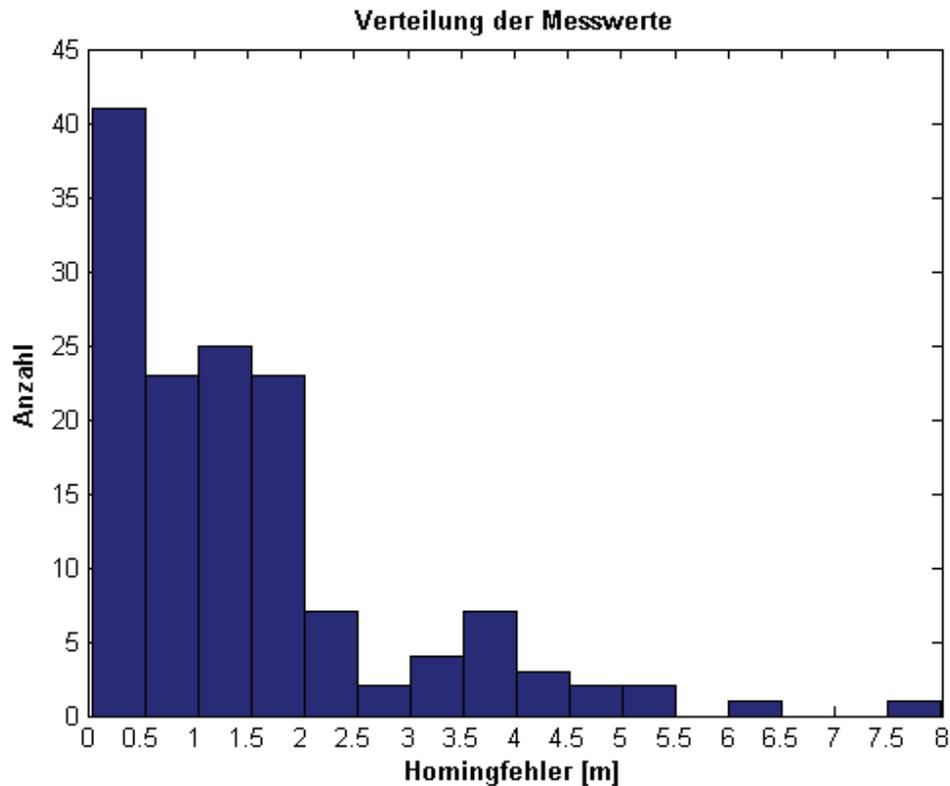


**Abb. 22:** Leistung der Versuchspersonen in den drei Runden: Der Homingfehler wurde von Runde 1 zu Runde 2 signifikant kleiner. In der dritten Runde stieg er über den Wert der ersten Runde an. Die Signifikanzen stammen aus Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests. Auf der X-Achse sind die einzelnen Runden aufgetragen, auf der Y-Achse der Homingfehler in Metern.



**Abb. 23:** Leistung der Versuchspersonen an den fünf Zielpunkten: Der Homingfehler schwankte bei den einzelnen Zielpunkten. Die rote Kurve entspricht dem Fehler in Runde 3, die blaue Kurve dem gemittelten Fehler aus Runde 1 und Runde 2. Auf der X-Achse sind die einzelnen Zielpunkte aufgetragen, auf der Y-Achse der Homingfehler in Metern.

Eine Analyse der Homingfehler ergab, dass keine Normalverteilung der Messwerte vorliegt (Abb. 24). Dabei wurde die Lilliefors-Modifikation des Kolmogoroff-Smirnoff-Tests verwendet ( $p < 0,001$ ). Die Messwerte zeigen eine Anhäufung in Richtung 0 Meter Abstand vom Zielpunkt. Da die Versuchspersonen bestrebt waren den Zielpunkt möglichst exakt zu finden und damit den Fehler möglichst klein zu halten, war solch eine Verteilung zu erwarten.



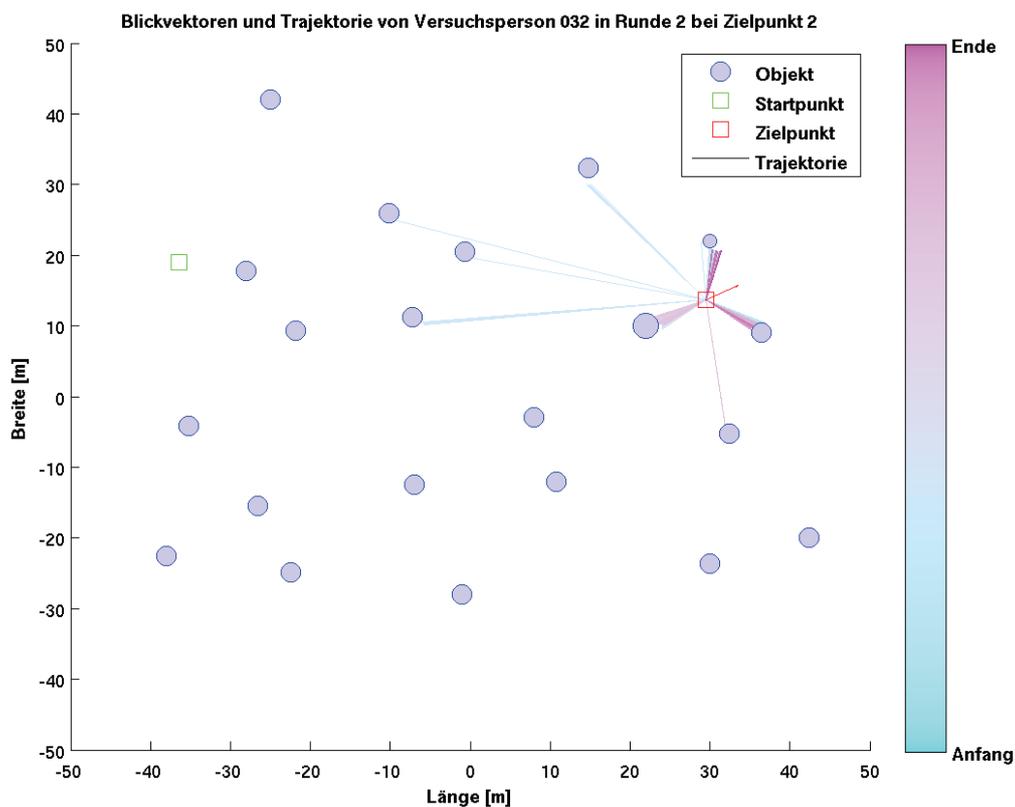
**Abb. 24: Histogramm zur Verteilung des gemessenen Homingfehlers:** Die Daten sind nicht normalverteilt, sondern häufen sich an je geringer der Fehler ist. Auf der X-Achse ist der Homingfehler in Metern aufgetragen, auf der Y-Achse die Anzahl der Messwerte im jeweiligen Abschnitt. Jeder Balken stellt dabei die Anzahl der Messwerte dar, die in einem 0,5 Meter Intervall zwischen der nächst kleineren und nächst größeren Grenze liegen.

## C 2.6 Blickvektoren, Fixationen und Salienz

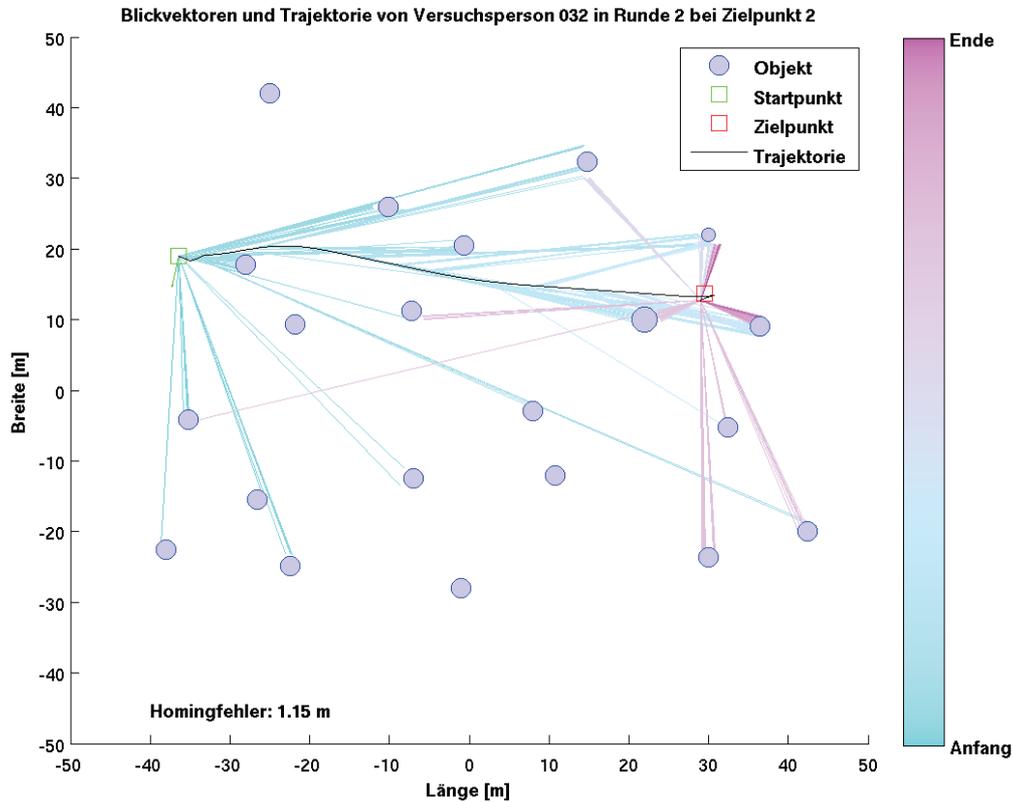
### C 2.6.1 Blickvektoren

Für jede Versuchsperson wurden die Blickvektoren in der Orientierungs- und Homingphase ausgewertet. In Abb. 25 und Abb. 26 sind exemplarisch die Blickvektoren von Versuchsperson 032 in Runde 2 an Zielpunkt 2 dargestellt. Eine Auswahl an typischen Blickvektoren und Läufen ist im Anhang beigefügt.

Es ist zu erkennen, dass in der Orientierungsphase der Großteil der Blickvektoren auf die drei umstehenden Objekte traf. In der anschließenden Homingphase lief der Proband mit wenigen Umwegen zum Zielpunkt und gab schließlich seinen Endpunkt in einer Entfernung von 1,15 Metern an. Am Anfang des Laufs trafen viele Blickvektoren auf Objekte, die nicht am Zielpunkt standen. Dem gegenüber waren am Ende viele Blickvektoren auf die umstehenden Objekte gerichtet.



**Abb. 25: Blickvektoren und Trajektorie: Orientierungsphase von Versuchsperson 032 in Runde 2 bei Zielpunkt 2.** Der rote Strich am Zielpunkt gibt die Initialblickrichtung in dieser Phase an. Die blau-lila Linien stellen die Blickvektoren der Versuchsperson zum jeweiligen Zeitpunkt auf die Objekte dar. Blaue Linien entsprechen den Blickvektoren zu Beginn, lila Linien den Blickvektoren am Ende des Laufs. Die unterschiedliche Größe der drei Kreise um den roten Zielpunkt symbolisiert die Salienz der Objekte: groß = hochsalient, mittel = mittelsalient, klein = niedersalient. Auf der X- und Y-Achse ist die Länge und Breite der Versuchsumgebung in Metern angegeben.

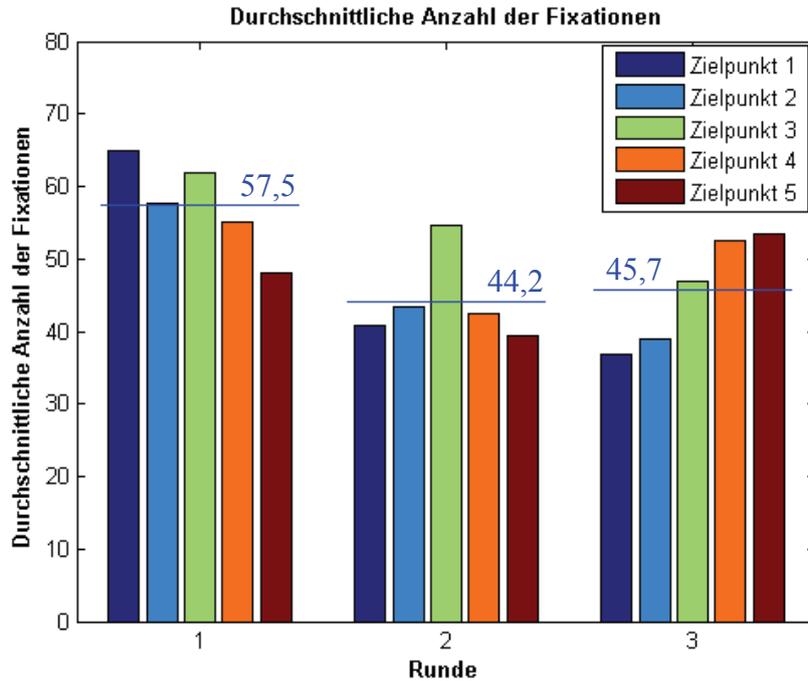


**Abb. 26: Blickvektoren und Trajektorie: Homingphase von Versuchsperson 032 in Runde 2 bei Zielpunkt 2.** Die Trajektorie (schwarz) führt vom Startpunkt (grün) an den Objekten vorbei (blau) in die Nähe des Zielpunktes (rot). Der grüne Strich gibt die Initialblickrichtung in dieser Phase an. Der Abstand vom End- zum Zielpunkt betrug 1,15 m. Die blau-lila Linien stellen die Blickvektoren der Versuchsperson zum jeweiligen Zeitpunkt auf die Objekte dar. Blaue Linien entsprechen den Blickvektoren zu Beginn, lila Linien den Blickvektoren am Ende des Laufs. Die unterschiedliche Größe der drei Kreise um den roten Zielpunkt symbolisiert die Salienz der Objekte: groß = hochsalient, klein = niedersalient, mittel = mittelsalient. Auf der X- und Y-Achse ist die Länge und Breite der Versuchsumgebung in Metern angegeben.

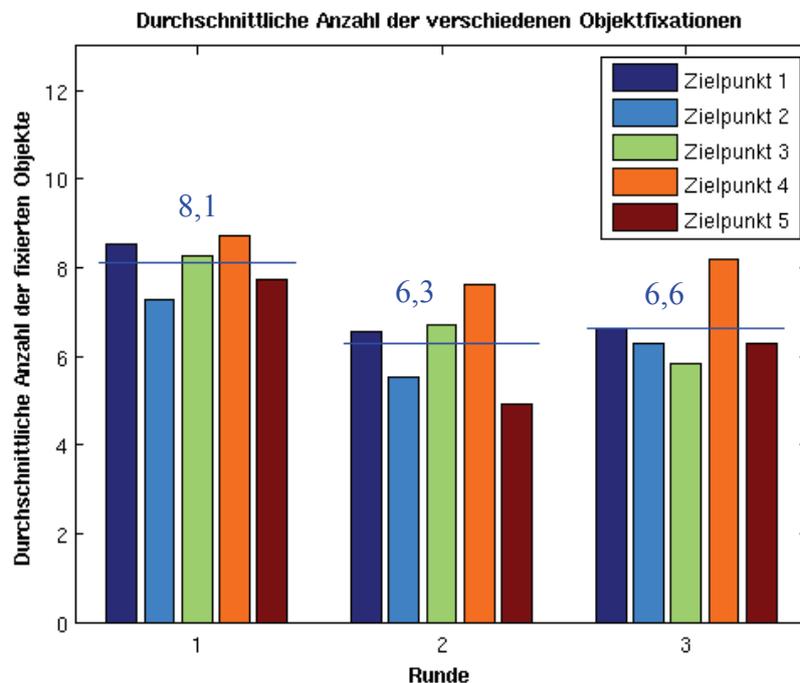
## C 2.6.2 Fixationen

Die Analyse aller von den Versuchspersonen getätigten Fixationen hatte zum Ergebnis, dass die durchschnittliche Anzahl aller Fixationen von Runde 1 zu Runde 2 von 57,5 auf 44,2 abnahm. In Runde 3 stieg sie auf 45,7 an (Abb. 27). Dabei waren Schwankungen in der Fixationsanzahl je nach Zielpunkt zu erkennen. Auf alle Runden gesehen betrug die durchschnittliche Fixationsanzahl 49,1 mit einer Standardabweichung von  $\pm 8,8$ .

In Abb. 28 ist die Anzahl der Fixationen auf unterschiedliche Objekte dargestellt. In Runde 1 wurden im Mittel 8,1 verschiedene Objekte fixiert. In Runde 2 nahm dies auf durchschnittlich 6,3 Objekte ab und stieg in Runde 3 wieder geringfügig auf 6,6 Objekte an.



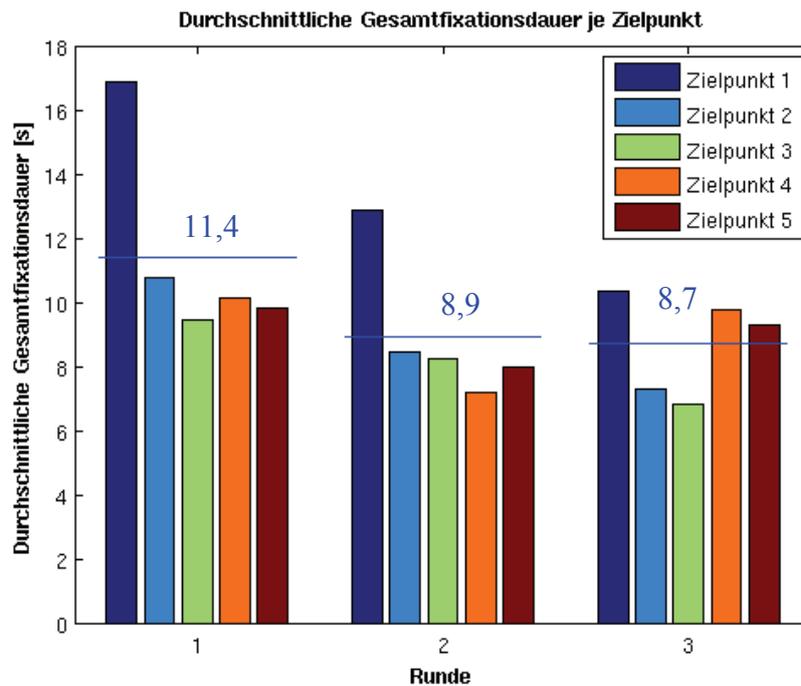
**Abb. 27: Anzahl der Fixationen an den Zielpunkten:** Die Fixationsanzahl war in Runde 1 am größten (57,5) und nahm in Runde 2 (44,2) ab. In der dritten Runde stieg sie nur minimal an (45,7). Auf der X-Achse sind die einzelnen Runden aufgetragen, auf der Y-Achse die durchschnittliche Anzahl der Fixationen. Die einzelnen Balken entsprechen den fünf Zielpunkten, die blauen Linien und Zahlen geben den Mittelwert der Runde an.



**Abb. 28: Anzahl der unterschiedlichen Objektfixationen an den Zielpunkten:** Die Anzahl der verschiedenen fixierten Objekte war in Runde 1 am größten (8,1) und nahm in Runde 2 ab (6,3). In der dritten Runde wurde die Anzahl wieder größer als in Runde zwei (6,6). Auf der X-Achse sind die einzelnen Runden aufgetragen, auf der Y-Achse die durchschnittliche Anzahl der unterschiedlichen fixierten Objekte. Die einzelnen Balken entsprechen den fünf Zielpunkten, die blauen Linien und Zahlen geben den Mittelwert der Runde an.

Die Betrachtung der mittleren Gesamtfixationsdauer an einem Zielpunkt offenbarte, dass die Fixationen an den Zielpunkten der ersten Runde eine Zeit von insgesamt durchschnittlich 11,4 Sekunden benötigten (Abb. 29). In Runde 2 sank die Dauer auf 8,9 Sekunden. In der dritten Runde verblieb die durchschnittliche Gesamtfixationsdauer an den Zielpunkten auf einem Wert von 8,7 Sekunden. Auffällig ist, dass in allen drei Runden die Fixationsdauer an Zielpunkt 1 am längsten war.

Die durchschnittliche Dauer einer einzelnen Fixation lag bei 195,7 Millisekunden.



**Abb. 29: Gesamtfixationsdauer je Zielpunkt:** Die Gesamtdauer aller Fixationen an den fünf Zielpunkten nahm von Runde 1 zu Runde 2 ab. In allen drei Runden war die Dauer an Zielpunkt 1 am größten. Auf der X-Achse sind die einzelnen Runden aufgetragen, auf der Y-Achse die durchschnittliche Anzahl der Fixationen. Die einzelnen Balken entsprechen den fünf Zielpunkten, die blauen Linien und Zahlen geben den Mittelwert der Runde an.

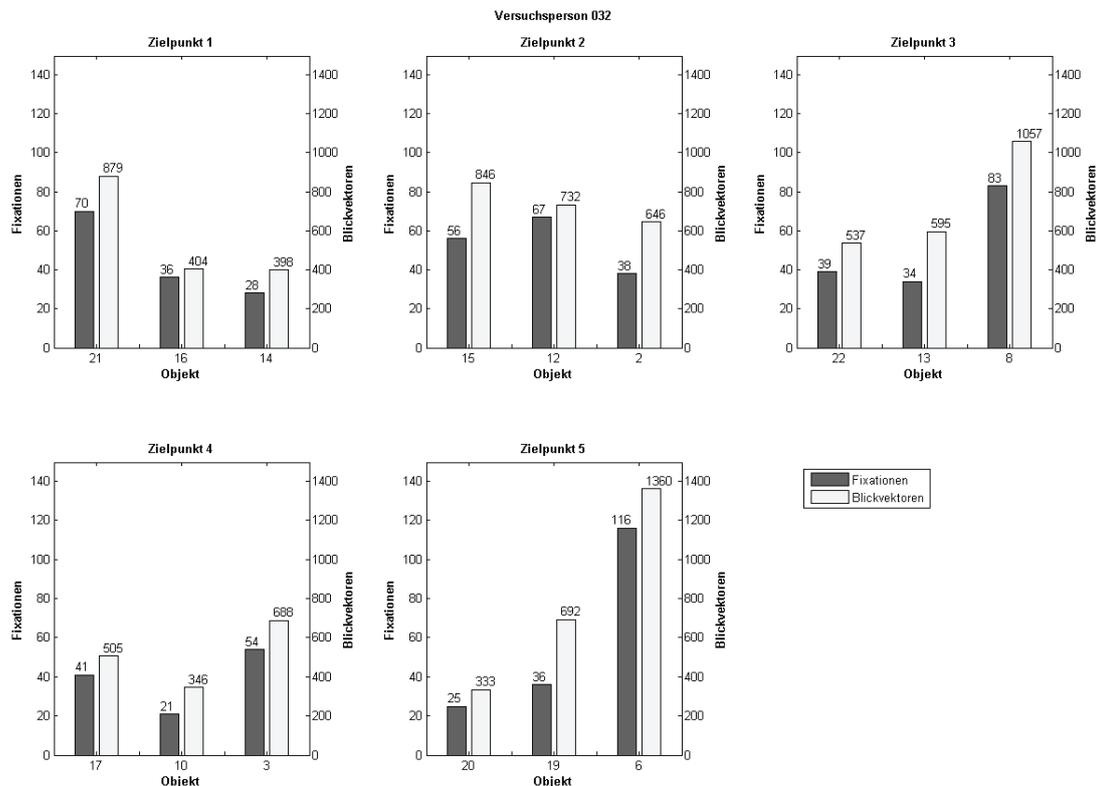
Das Objekt mit den meisten Fixationen war der Schneemann. Fünf von elf Versuchspersonen fixierten ihn am häufigsten mit durchschnittlich 92,2 Fixationen. Die mittlere Gesamtfixationsdauer auf ihn betrug 13,62 Sekunden. An zweiter Stelle stand der Elefant mit durchschnittlich 77,5 Fixationen und einer mittleren Gesamtfixationsdauer von 20,52 Sekunden. Er wurde von zwei Probanden als häufigstes Objekt fixiert.

Die längsten Einzelfixationen entfielen auf den Hasen. Bei drei Versuchspersonen entfiel jeweils die längste Fixation auf ihn. Dabei lag die Dauer im Mittel bei 2,58 Sekunden. Auf den Pinguin entfielen ebenfalls bei drei Versuchspersonen die längsten Fixationen, jedoch mit einer durchschnittlichen Dauer von 1,91 Sekunden. Eine mögliche Erklärung für die lang andauernden Fixationen an Zielpunkt 1, die vor allem durch die Fixationen auf den Hasen zustande kommen, wäre das Aussehen dieses Objekts. Der Hase zählt zu den komplexeren Modellen und repräsentiert ein belebtes Objekt. Gleichzeitig ist das Modell einfarbig gehalten und verfügt über keine herausgearbeiteten Details, wie zum Beispiel Nase oder Augen, so dass die

Probanden möglicherweise längere Fixationen auf diese Bereiche des Hasen gelegt haben, um die Form besser erkennen zu können. Bei der Auswertung dieses Experiments wurden die Objekte stets als Ganzes betrachtet und es erfolgte keine Aufteilung in einzelne Partien, so dass kein Beleg für die Vermutung existiert.

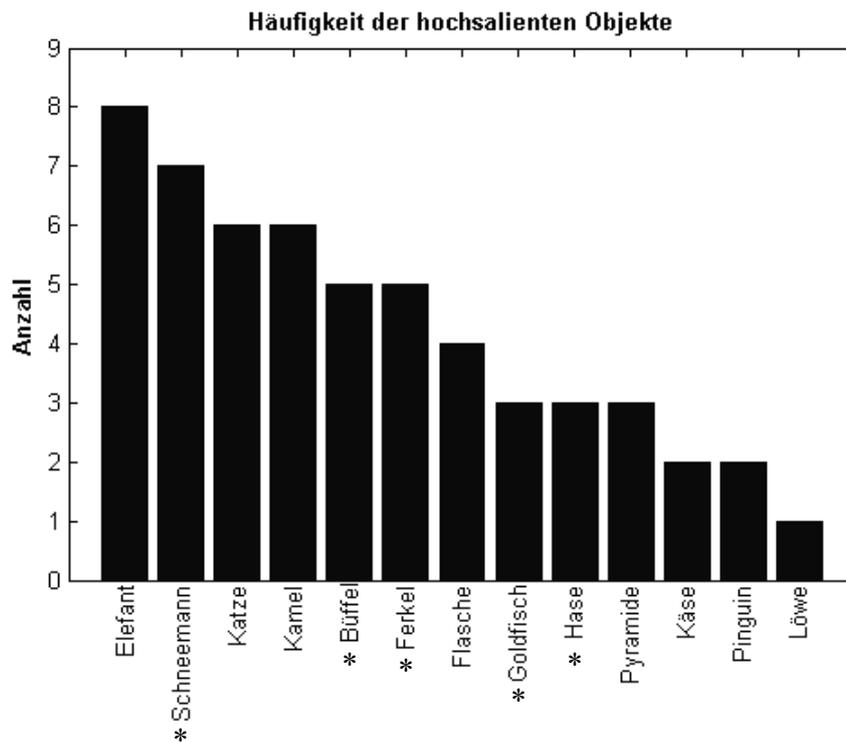
### C 2.6.3 Salienzeinteilung

Die Einteilung der umstehenden Objekte um den Zielpunkt in die drei Salienzgruppen wurde für jede Versuchsperson individuell vorgenommen. Dazu wurde die Summe der Fixationen auf diese Objekte während den Orientierungsphasen von Runde 1 und 2 verwendet. Die Salienzeinteilung aller Probanden ist im Anhang beigefügt. In Abb. 30 sind die Blickvektoren und die Fixationen der Versuchsperson 032 auf die drei umstehenden Objekte am jeweiligen Zielpunkt dargestellt. Die hellen Balken (rechte Skala) geben die Anzahl der Blickvektoren auf das Objekt an, die dunklen Balken (linke Skala) die Anzahl der Fixationen auf das Objekt. Entsprechend der Fixationsanzahl wurde den Objekten ein Rang zugewiesen, wobei das Objekt mit den meisten Fixationen als hochsalient, das Objekt mit den wenigsten als niedersalient und das dritte Objekt als mittelsalient eingeteilt wurde. An Zielpunkt 1 war Objekt Nummer 21 (Hase) hochsalient, Objekt Nummer 16 (Elefant) mittelsalient und Objekt Nummer 14 (Kegel) niedersalient. Eine Übersicht über die Zuordnung der Nummern zu den Objekten ist im Anhang zu finden.



**Abb. 30: Salienzeinteilung von Proband Nr. 032: Für jeden Zielpunkt wurde ein Diagramm der Fixationsanzahl (dunkle Balken) und der Blickvektoren (helle Balken) für die drei umstehenden Objekte erstellt. Das Objekt mit den meisten Fixationen wurde als hochsalient eingestuft. Die linke Y-Achse gibt die Anzahl der Fixationen an, die rechte Y-Achse die Anzahl der Blickvektoren. Auf der X-Achse sind die drei umstehenden Objekte mit ihrer Nummer angegeben.**

In Abb. 31 ist dargestellt, wie oft ein Objekt hochsalient war. Dabei wurden jeweils die drei umstehenden Objekte um jeden Zielpunkt berücksichtigt. Insgesamt sind 55 Nennungen enthalten (11 Versuchspersonen x 5 Zielpunkte). Die mit einem Stern (\*) versehenen Objekte wurden in der Homingphase der dritten Runde ausgeblendet. Der Elefant, der Schneemann, die Katze und das Kamel wurden am häufigsten in die hochsaliente Gruppe eingeteilt. Der Käse, der Pinguin und der Löwe hingegen wurden nur zweimal beziehungsweise einmal als hochsalientes Objekt gewertet.



**Abb. 31: Anzahl der Fälle, in denen ein Objekt hochsalient war: Der Elefant wurde acht Mal als hochsalientes Objekt klassifiziert und war somit das häufigste hochsaliente Objekt. Die mit einem Stern (\*) versehenen Objekte wurden in der Homingphase der dritten Runde ausgeblendet. Auf der X-Achse sind die verschiedenen Objekte aufgetragen, auf der Y-Achse die Anzahl der Fälle, in denen das Objekt als hochsalient klassifiziert wurde.**

Abb. 32 zeigt wie oft die ausgeblendeten Objekte jeweils in die drei Saliengruppen eingeteilt wurden. Die Werte der ersten Zeile entsprechen dabei den Werten der ausgeblendeten Objekte (\*) aus Abb. 31. Die mittlere Zeile zeigt, wie oft eines der ausgeblendeten Objekte der Gruppe mit mittlerer Salienz zugeordnet wurde und in der unteren Zeile entsprechend der niedrigen Salienz. Am Beispiel des Ferkels erklärt bedeutet dies, dass dieses Objekt für fünf Versuchspersonen hochsalient war, für fünf weitere Versuchspersonen war es mittelsalient und für eine Versuchsperson niedersalient. Der Schneemann (Objekt Nummer 8) war hierbei für keinen Probanden niedersalient.

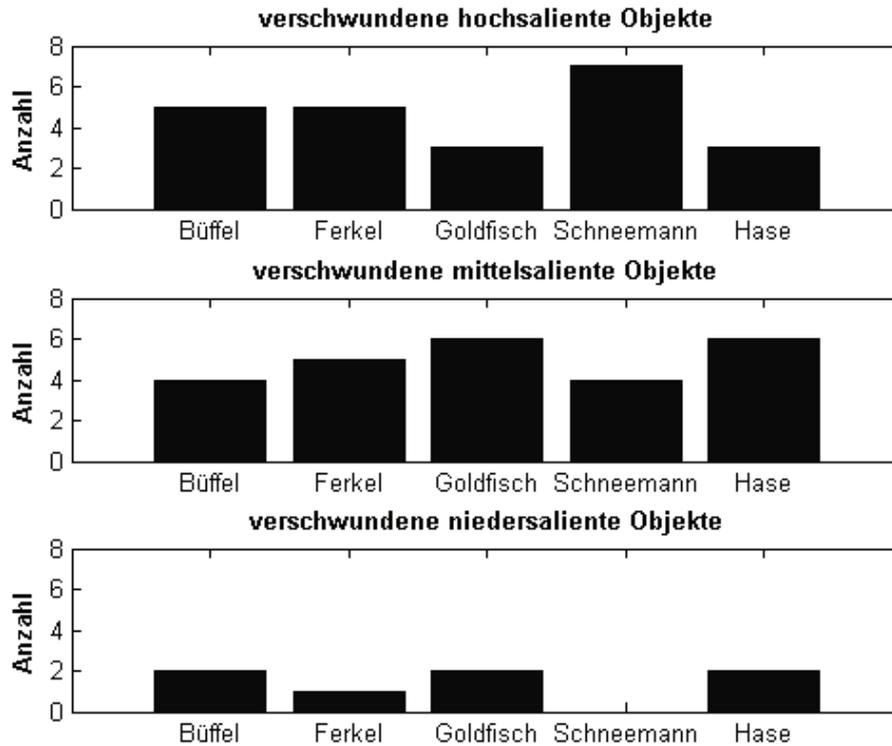


Abb. 32: Anzahl der Fälle, in denen die ausgeblendeten Objekte in die Kategorien hoch-, mittel- und niedersalient eingeteilt wurden. Auf der X-Achse sind die verschiedenen Objekte aufgetragen, auf der jeweiligen Y-Achse die Anzahl der Fälle, in denen das Objekt als hoch-, mittel- beziehungsweise niedersalient klassifiziert wurde.

## C 2.6.4 Auswertung des Homingfehlers in Bezug zur Salienz

### C 2.6.4.1 Salienz der umstehenden Objekte

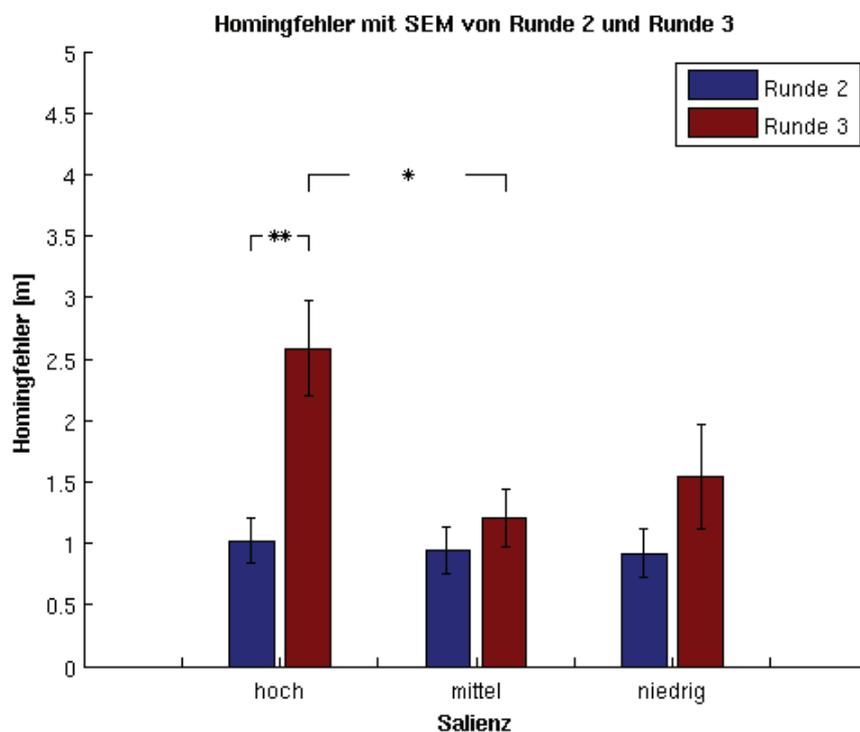
Nachdem für jede Versuchsperson eine Salienzeinteilung erstellt wurde, wurde die Leistung der Probanden, den Zielpunkt möglichst genau zu finden, in Bezug zum ausgeblendeten Objekt gesetzt und wie häufig dieses fixiert wurde. Bei insgesamt gemessenen 47 Endpunkten pro Runde wurden dabei 20 Messwerte dem Ausblenden von hochsalienten Objekten zugewiesen, 21 Messwerte mittelsalienten und 6 Messwerte niedersalienten Objekten.

In Abb. 33 wurde der Homingfehler der Versuchspersonen gegen die Salienz aufgetragen. Die blauen Balken beinhalten die Fehler der zweiten Runde, die roten Balken die der dritten Runde. Wenn in der dritten Runde eines der hochsalienten Objekte am entsprechenden Zielpunkt ausgeblendet wurde, machten die Probanden einen signifikant größeren Fehler als wenn eines der mittelsalienten Objekte ausgeblendet wurde (U-Test,  $p = 0,013$ ). Der durchschnittliche Homingfehler verdoppelte sich in jenen Fällen.

Es war kein signifikanter Unterschied zwischen dem Ausblenden eines der mittel- und eines der niedersalienten Objekte zu erkennen. Auch das Ausblenden eines hochsalienten Objekts hatte im Vergleich mit einem niedersalienten Objekt keine signifikante Änderung des Homingfehlers zur Folge. In den Fällen, in denen am Zielpunkt ein hochsalientes Objekt ausgeblendet wurde, war der Homingfehler

signifikant größer, als an denselben Zielpunkten in Runde 2 (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test:  $p = 0,003$ ). Obwohl bei den entsprechenden Vergleichen bei mittel- und niedersalienten Objekten der mittlere Homingfehler in Runde 3 ebenfalls größer war als in Runde 2, war kein signifikanter Unterschied zu erkennen.

Da es zwischen dem mittleren Homingfehler beim Ausblenden von mittel- beziehungsweise niedersalienten Objekten zu keinem signifikanten Unterschied kam und nur wenige Messwerte den niedersalienten Objekten zugewiesen werden konnten, liegt der hohe p-Wert des U-Tests von 0,411 beim Vergleich von hoch- und niedersalienten Objekten in der geringen Anzahl der Messwerte in der niedersalienten Gruppe begründet.



**Abb. 33: Homingfehler in Abhängigkeit der Salienz:** Während sich die Homingfehler in Runde 2 (blau) nicht voneinander unterschieden, hatte das Ausblenden eines hochsalienten Objekts in Runde 3 (rot) einen signifikant größeren Homingfehler zur Folge, als wenn ein mittelsalientes Objekt ausgeblendet wurde. Auf der X-Achse ist die Einteilung in die Salienzgruppen aufgetragen, auf der Y-Achse der Homingfehler in Metern.

Die Werte aus der ersten Runde wurden hierbei nicht berücksichtigt, da Runde 1 als Training konzipiert war. Durch die Verbesserung der Versuchspersonen von der ersten zur zweiten Runde, zwischen denen keinen Unterschied in den Versuchsbedingungen existiert, wird der Lerneffekt deutlich.

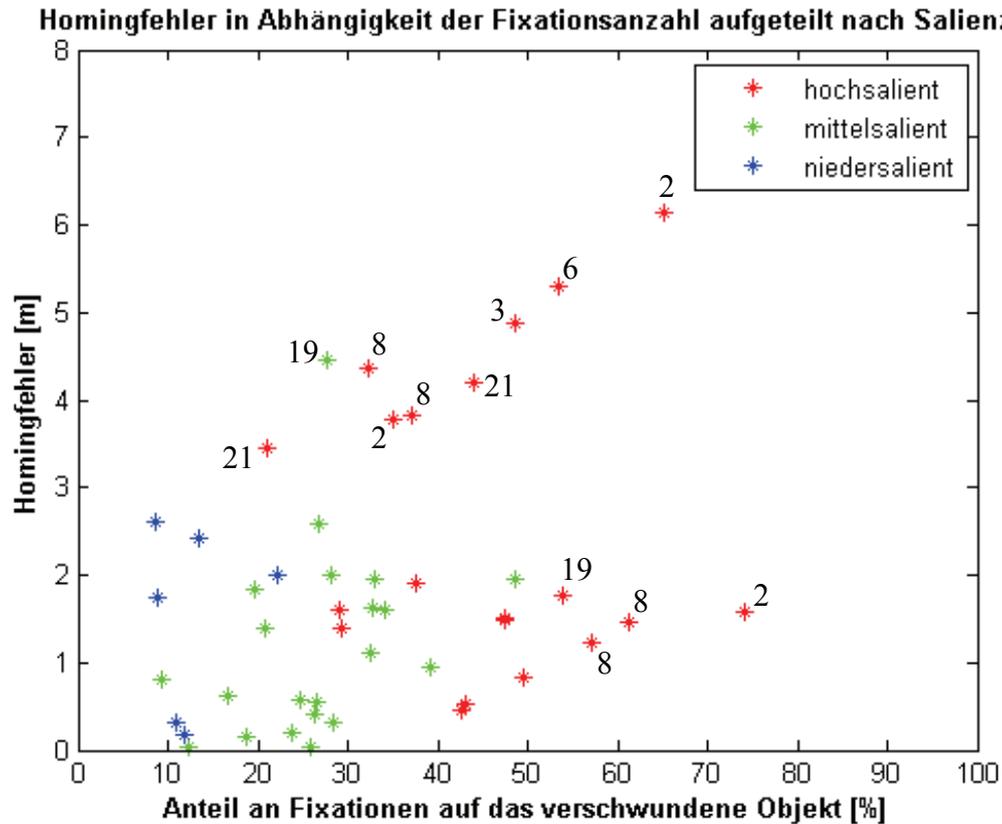
#### **C 2.6.4.2 Salienz aller Objekte**

Den Versuchspersonen war es durch die große Anzahl von Objekten möglich, sich auch an weiter entfernten Objekten zu orientieren. Um den Zusammenhang zwischen dem Homingfehler und den Fixationen auf alle Objekte zu untersuchen, wurde nun die Anzahl der Fixationen auf das auszublendende Objekt in Relation zu allen Fixationen auf die vorhandenen Objekte gesetzt. Wenn es einen direkten Zusammenhang zwischen dem Fixationsanteil auf das auszublendende Objekt und dem Homingfehler gibt und dieser Fixationsanteil das ausschlaggebende Kriterium für die Leistung bei dieser Wegfindungsaufgabe ist, so müsste es eine Korrelation zwischen diesen beiden Faktoren geben.

In den folgenden Abbildungen ist auf der Y-Achse der Homingfehler und auf der X-Achse der prozentuale Anteil an Fixationen auf das auszublendende Objekt gegenüber allen Fixationen, die auf die 21 Objekte gemacht wurden, aufgetragen.

In Abb. 34 sind die Messpunkte entsprechend den drei Salienzeinteilungen aufgeteilt und teilweise mit den Nummern der Objekte versehen. Im linken Bereich, in dem nur ein geringer Anteil an Fixationen auf das auszublendende Objekt gemacht wurde, war der Homingfehler klein. Ab einem Fixationsanteil von circa 20 Prozent teilen sich die Fehlerwerte scheinbar in zwei Bereiche auf. In einen Bereich sind die Fälle, in denen der Homingfehler mit steigendem Fixationsanteil auf das auszublendende Objekt ansteigt. Im anderen Bereich bleibt der Fehler bei einem steigenden Fixationsanteil etwa gleich groß.

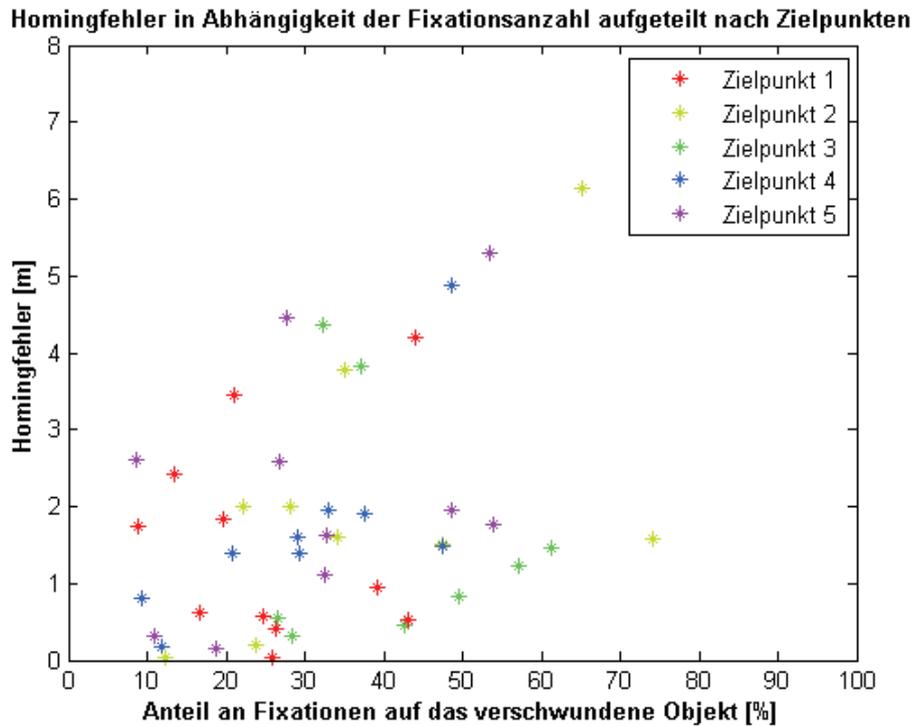
Der Homingfehler bei niedersalienten Objekten liegt im linken Bereich und ist eher klein (blaue Sterne). Bei mittelsalienten Objekten (grüne Sterne) liegt der Fixationsanteil im Bereich zwischen 15 und 40 Prozent und befindet sich, mit einer Ausnahme von 4,5 Metern, im gleichen Homingfehlerbereich bis 3 Meter wie die niedersalienten Objekte. Die oben beschriebene Aufteilung in zwei Bereiche ist hauptsächlich auf die Homingfehler bei hochsalienten Objekten (rote Sterne) zurückzuführen (siehe Histogramm Abb. 38). Die Aufteilung lässt sich nicht auf einen Effekt des auszublendenden Objekts zurückführen, da sowohl im oberen als auch im unteren Bereich dieselben Objekte ausgeblendet wurden (siehe Objektnummern in der Abbildung).



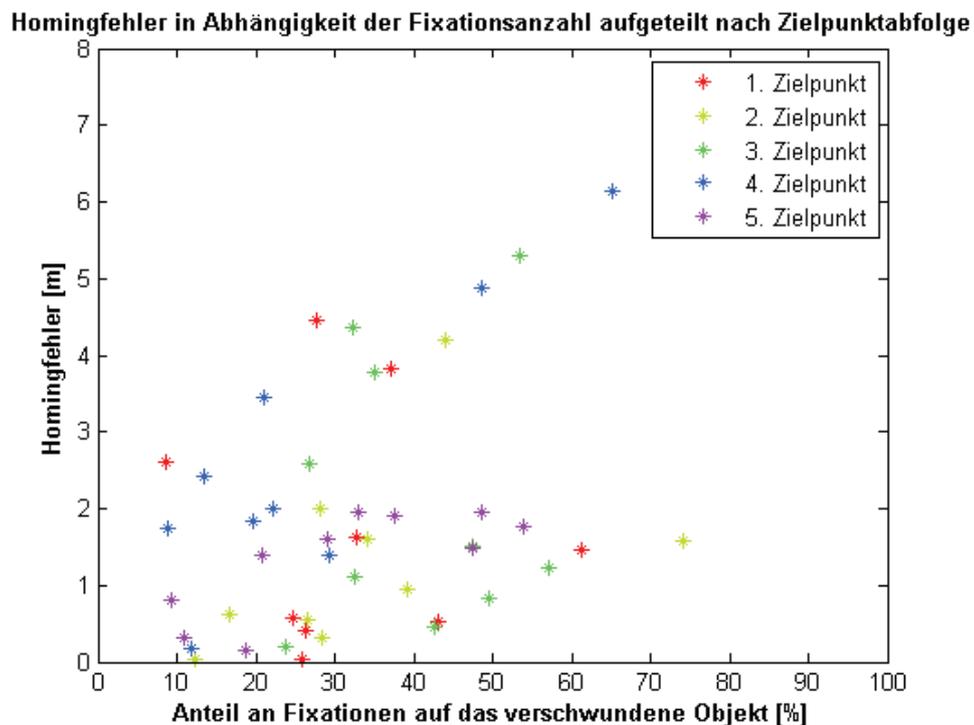
**Abb. 34:** Homingfehler in Abhängigkeit der Fixationsanzahl aufgeteilt nach Salienz: Auf niedersaliente Objekte (blau) entfiel nur ein geringer Prozentsatz der Fixationen. Der Homingfehler war dabei gering. Mittel- (grün) und hochsaliente (rot) Objekte hatten einen größeren Fixationsanteil. Der Homingfehler beim Ausblenden von hochsalienten Objekten teilt sich in zwei Bereiche. Auf der Y-Achse ist der Homingfehler in Metern, auf der X-Achse der Fixationsanteil auf das auszublendende Objekt gegenüber allen 21 Objekten aufgetragen. Die Zahlen an den Datenpunkten stellen die Objektnummern der ausgeblendeten Objekte dar.

Um zu untersuchen, ob ein anderer Zusammenhang zwischen dem Ansteigen des Homingfehlers und dem Fixationsanteil besteht, wurde weiterhin die Verteilung der Messwerte auf eine Verknüpfung mit den fünf Zielpunkten überprüft. Wie in Abb. 35 zu sehen, gab es keinen Zusammenhang zwischen den Zielpunkten und der Aufteilung in die beiden Bereiche, da alle Zielpunkte sowohl im oberen als auch im unteren Bereich vorkommen.

In Abb. 36 wurden die Homingfehler entsprechend der Abfolge aufgeteilt, in der die Versuchspersonen an die Zielpunkte gebracht wurden. Die Vermutung, dass die Probanden beim ersten Lauf nach dem Ausblenden eines Objekts in Runde 3 einen größeren Fehler machen als danach ließ sich nicht bestätigen. Es ließ sich kein Zusammenhang zwischen der Zielpunktreihenfolge und dem Homingfehler erkennen.

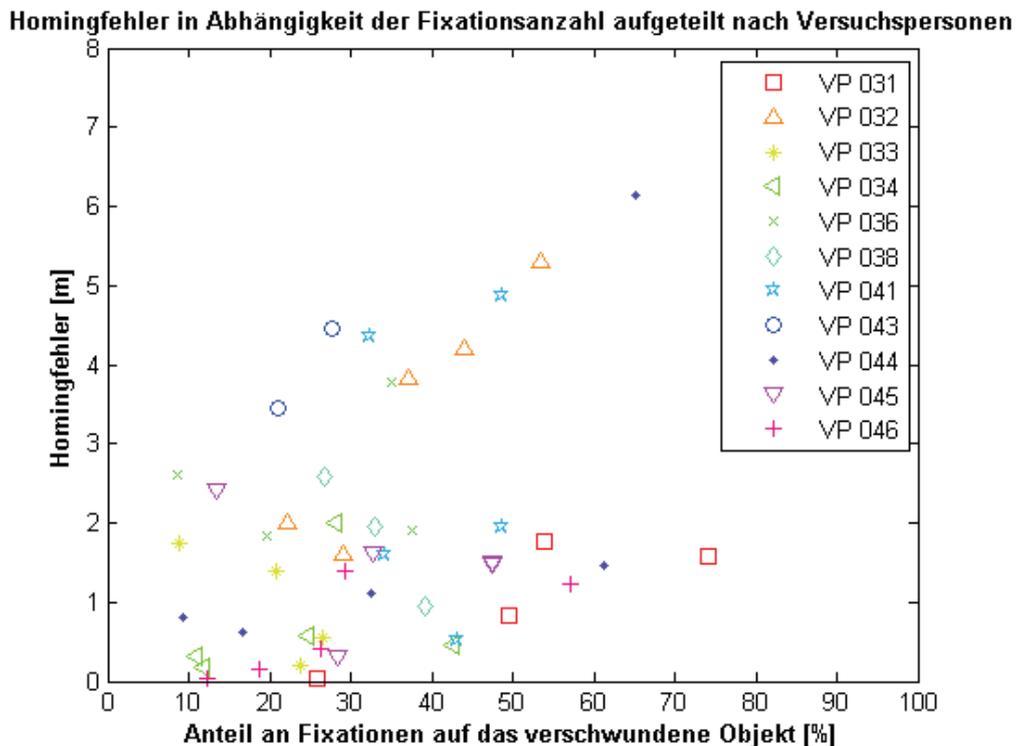


**Abb. 35: Homingfehler in Abhängigkeit der Fixationsanzahl aufgeteilt nach Zielpunkten:** Der Homingfehler und die Fixationsanzahl variierten, jedoch nicht in Bezug auf die Zielpunkte. Auf der Y-Achse ist der Homingfehler in Metern, auf der X-Achse der Fixationsanteil auf das auszublenkende Objekt gegenüber allen 21 Objekten aufgetragen.



**Abb. 36: Homingfehler in Abhängigkeit der Fixationsanzahl aufgeteilt nach Zielpunktabfolge:** Der Homingfehler und die Fixationsanzahl variierten, jedoch nicht in Bezug auf die Zielpunktabfolge. Auf der Y-Achse ist der Homingfehler in Metern, auf der X-Achse der Fixationsanteil auf das auszublenkende Objekt gegenüber allen 21 Objekten aufgetragen.

Zuletzt wurde noch der Einfluss der einzelnen Versuchspersonen untersucht (Abb. 37). Versuchsperson 033 lag sowohl beim Fixationsanteil als auch beim Homingfehler im unteren Bereich. Bei Versuchsperson 032 wurde der Homingfehler größer, je größer der Fixationsanteil auf das auszublendende Objekt war.

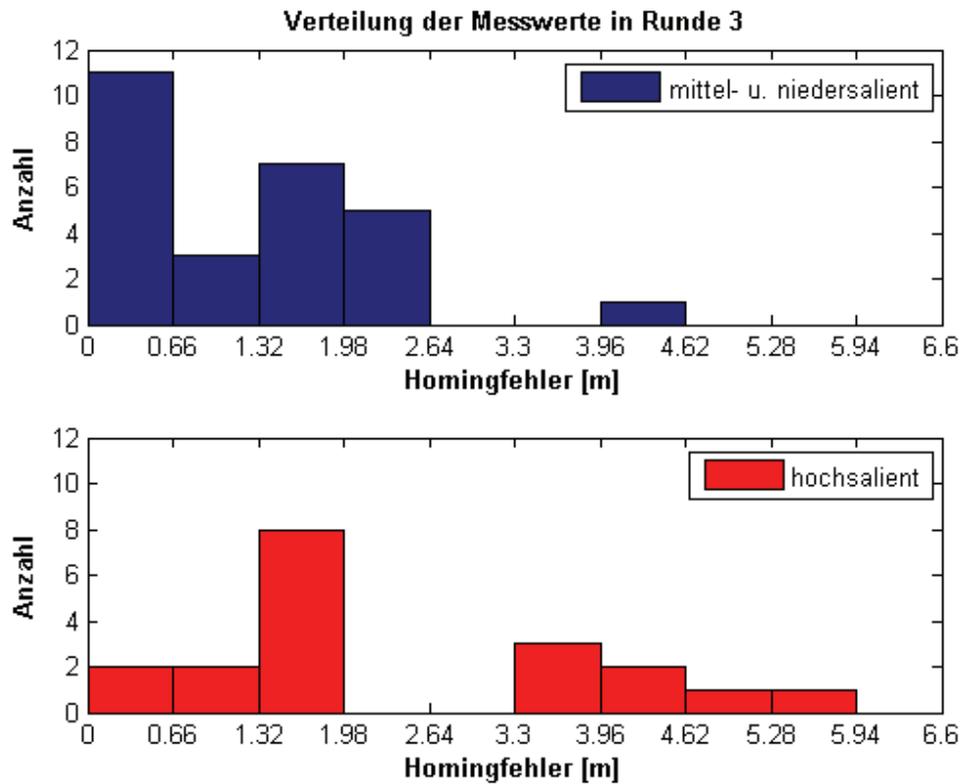


**Abb. 37: Homingfehler in Abhängigkeit der Fixationsanzahl aufgeteilt nach Versuchspersonen: Homingfehler und Fixationsanteil unterscheiden sich sowohl zwischen den Versuchspersonen als auch bei der einzelnen Versuchsperson zwischen den Läufen. Auf der Y-Achse ist der Homingfehler in Metern, auf der X-Achse der Fixationsanteil auf das auszublendende Objekt gegenüber allen 21 Objekten aufgetragen.**

Die Existenz dieser zwei Bereiche wird durch die Verteilungen der Messwerte, die in Abb. 38 dargestellt sind, nochmals deutlich. Die Messwerte beim Ausblenden von hochsalienten Objekten scheinen bimodal verteilt zu sein.

Eine Erklärung für dieses Aufspalten wäre die Verwendung von zwei unterschiedlichen Strategien, um die Aufgabe zu lösen. In den Fällen, in denen es anscheinend einen Zusammenhang zwischen dem Fixationsanteil auf das verschwundene Objekt und dem Homingfehler gibt, konnten die Versuchspersonen das Fehlen des Objekts, und somit der Information über die Position, mit steigendem Fixationsanteil immer schlechter ausgleichen.

In den anderen Fällen, in denen sich der Homingfehler mit steigendem Fixationsanteil kaum veränderte, war es den Probanden möglich den Zielpunkt mit Hilfe von zusätzlichen Informationen über die Position zu finden. Um welche Informationen es sich hierbei handelte ließ sich mit diesem Experiment nicht ergründen.



**Abb. 38:** Verteilung der Messwerte in Runde 3: Die Homingfehler bei hochsalienten Objekten (rot) folgen anscheinend einer bimodalen Verteilung. Auf der X-Achse ist der Homingfehler in Metern, auf der Y-Achse die Anzahl der Messwerte im jeweiligen Abschnitt aufgetragen. Jeder Balken stellt dabei die Anzahl der Messwerte dar, die in einem 0,66 Meter Intervall zwischen der nächst kleineren und nächst größeren Grenze liegen.

## C 2.7 Ausschluss von Versuchspersonen

Insgesamt nahmen 16 Versuchspersonen am Versuch teil. Davon konnten die Daten von 5 Personen nicht verwendet werden, da sie entweder Hilfsmittel zur Navigation benutzt haben, die Ausfallrate bei der Datenaufzeichnung zu groß war oder beim PTA-Test zu schlecht abschnitten. Eine Übersicht über die Versuchspersonen ist in Tab. 4 dargestellt. Die mit einem X versehenen und grau hinterlegten Zeilen markieren die Versuchspersonen, deren Daten nicht in die Auswertung einfließen. Die Versuchspersonennummer 039 existiert nicht, da die für den Versuch eingeladene Person nicht erschien und beim nächsten Probanden weitergezählt wurde.

VP-Nr.	PTA-Test	Ausfall [%]	Begründung für Ausschluss
X 030	33	8,584	Spiegel und Leinwandrand benutzt
031	31	15,554	-
032	25	8,794	-
033	38	4,796	-
034	24	10,025	-
X 035	19	14,846	PTA + Ausfallrate + falscher Zielpunkt
036	29	6,552	-
X 037	15	18,554	PTA + Ausfallrate
038	29	4,968	-
X 040	17	27,465	PTA + Ausfallrate
041	29	3,428	-
X 042	30	15,225	Spiegel verstellt, Helm verrutscht
043	28	11,582	-
044	32	9,451	-
045	30	10,696	-
046	28	4,983	-

**Tab. 4: Übersicht über die Versuchspersonen: In der ersten Spalte sind die Nummern der Versuchspersonen aufgeführt, in der zweiten Spalte den Wert, den sie im PTA-Test erhielten. Die dritte Spalte enthält die Messausfallrate während des Versuchs in Prozent und in der vierten Spalte stehen die Gründe für das Verwerfen der Daten. Die mit einem X versehenen und grau hinterlegten Zeilen markieren die Versuchspersonen, die nicht in die Auswertung einbezogen wurden.**

Versuchsperson 030 hat, nach eigenen Angaben, während des Versuchs mit Hilfe der Leinwandränder und dem Spiegel am Eyetracker die Abstände zwischen den Objekten versucht auszumessen. Da der Versuch die Navigation in einer virtuellen Umgebung anhand von Objekten untersucht und auch in einer natürlichen Umgebung solche Hilfsmittel nicht vorhanden sind, wurde diese Versuchsperson von der Auswertung ausgeschlossen.

Bei Versuchsperson 035 kamen mehrere Faktoren zum tragen. Der PTA-Wert lag unter 20, ab welchem der Versuchsperson vom Programm eine gute Orientierungsleistung zugeschrieben wird. Der Proband lief in Runde 2 von Startpunkt 4 zum Zielpunkt 3, anstatt zu Zielpunkt 4. Des Weiteren war die Ausfallrate relativ hoch. Jedes Kriterium für sich wäre kein Grund für einen

Ausschluss des Probanden, jedoch die Summe der Faktoren führte dazu, dass die Daten verworfen wurden.

Versuchsperson 037 hatte einen schlechten PTA-Wert und auch die Messausfälle während des Versuchs waren groß. Beide Punkte führten zu einem Ausschluss.

Bei Versuchsperson 040 galten dieselben Kriterien wie bei Proband Nr. 037. Sowohl der PTA-Wert als auch die Ausfallrate führten zum Ausschluss.

Die Daten von Versuchsperson 042 wurden verworfen, weil der Proband zum einen während des Versuchs mit der Hand an den Spiegel des Eyetrackers stieß (dies auch selbst berichtete) und zum anderen der Helm über die Dauer des Versuchs seitlich verrutschte. Beides führte dazu, dass durch die veränderten Positionen des Helms und des Spiegels die Referenz zur Kalibrierung am Anfang nicht mehr übereinstimmte, so dass die aufgezeichneten Augenbewegungsdaten nicht die Blicke der Versuchsperson beschreiben.

## **C 2.8 *Ausschluss einzelner Läufe***

### **C 2.8.1 *Orientierungsverlust***

Bei der Auswertung der Daten der verbleibenden 11 Versuchspersonen zeigten sich in der Übersicht über die Endpositionen (Abb. 39), wie auch bei der Verteilung der Messdaten (Abb. 40) einige Werte, die eine sehr große Abweichung von den anderen hatten. Während des Versuchs gaben zwei Versuchspersonen in jeweils einem Fall an, die Orientierung verloren und sich völlig verlaufen zu haben und nicht mehr zu wissen wohin sie gehen sollten. Sie drückten bei der Position, bei der sie sich in dem Augenblick befanden den Knopf am Joystick, um mit dem Versuch fortzufahren. Diese Fälle wurden vom Experimentator vermerkt.

In zwei Fällen lagen die Endpunkte sehr weit von den Zielpunkten entfernt: Versuchsperson 043 in Runde 3 bei Zielpunkt 4 und Versuchsperson 031 in Runde 3 bei Zielpunkt 4. Bei beiden Messwerten, die einen Abstand von 55,6 und 27,3 Metern aufwiesen, handelte es sich um die Fälle, in denen die Probanden angaben sich verlaufen zu haben (rote Markierung in Abb. 40). Da die Werte somit nicht die wirkliche Leistung der Versuchspersonen in der Aufgabenstellung widerspiegelten, wurden diese beiden Werte bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt. In der Auswertung wurde unter anderem ein Vergleich der Versuchspersonenleistung zwischen den einzelnen Runden durchgeführt. Da die Daten jeweils von derselben Versuchsperson stammten und somit abhängig waren, wurden auch die Messdaten der anderen Runden an dem jeweiligen Zielpunkt verworfen (Tab. 5).

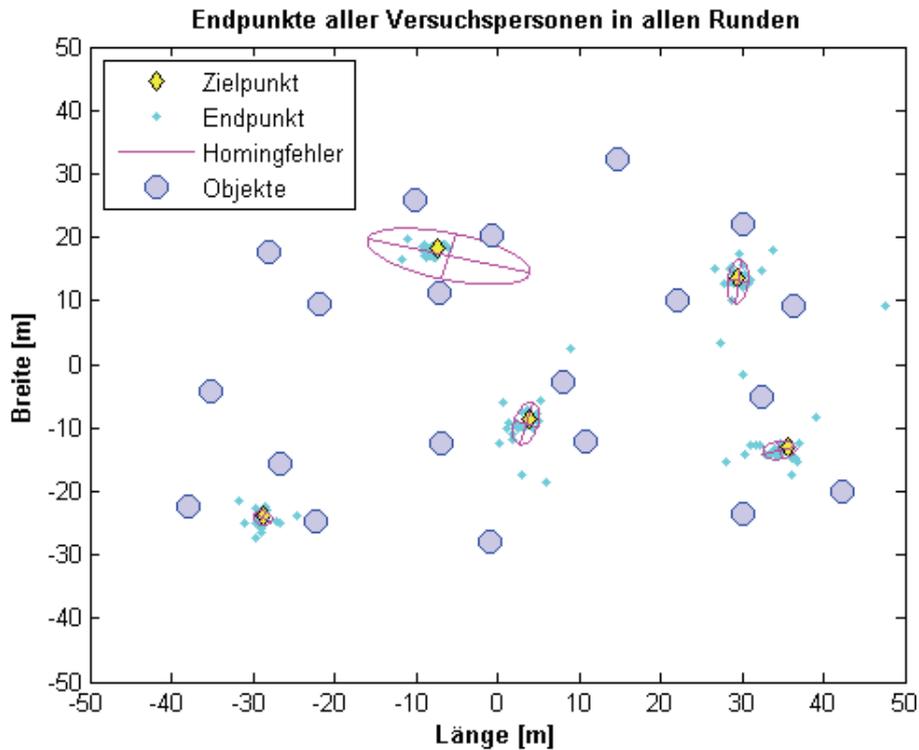


Abb. 39: Endpositionen der Versuchspersonen: Einige der Endpunkte lagen weit vom zu findenden Zielpunkt entfernt. Besonders deutlich ist dies bei Zielpunkt 4 und dessen Ellipse zu sehen. Die blauen Kreise symbolisieren die Objekte an ihrer jeweiligen Position. Auf den Achsen sind die Länge und Breite der virtuellen Umgebung aufgetragen.

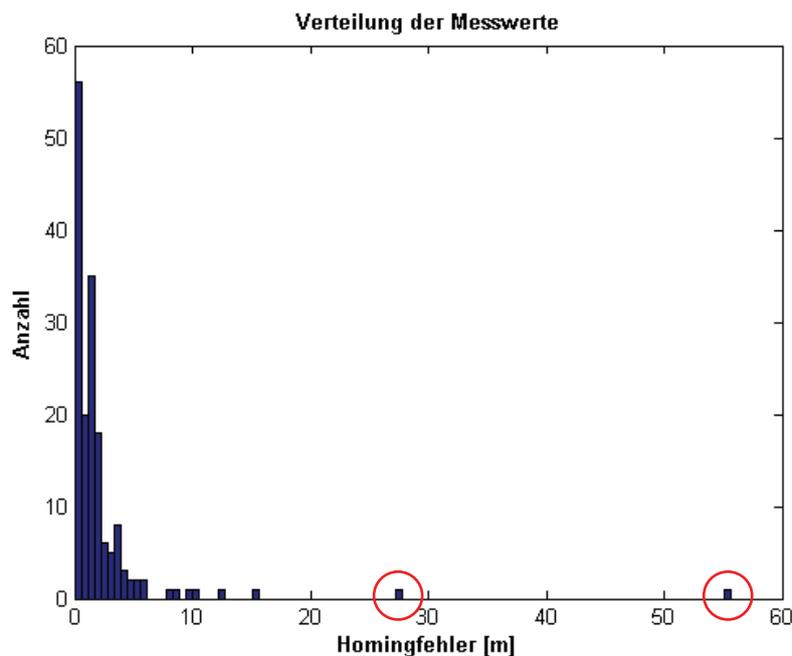
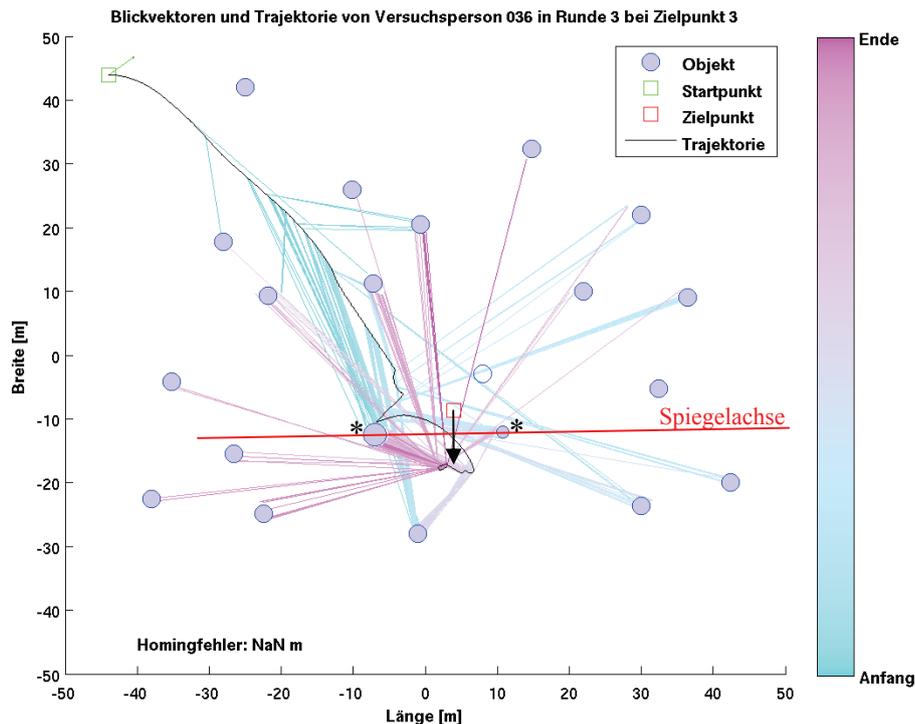


Abb. 40: Histogramm zur Verteilung des gemessenen Homingfehlers: Während sich der Großteil der Werte im Bereich zwischen 0 und 5 Metern befindet, liegen einige wenige jenseits von 10 Metern. Die beiden roten Kreise markieren die Messwerte, bei denen die Versuchspersonen angaben sich verlaufen zu haben. Auf der X-Achse ist der Homingfehler in Metern aufgetragen, auf der Y-Achse die Anzahl der Messwerte im jeweiligen Abschnitt.

## C 2.8.2 Spiegelfehler

Bei der Auswertung der Trajektorien zeigte sich bei vier Probanden in sechs Fällen ein abweichendes Verhalten zu den anderen Probanden (siehe auch G Anhang). Die Versuchspersonen liefen zu einem Punkt, der in etwa dem Zielpunkt entspräche wenn man diesen an einer Achse spiegeln würde, welche durch zwei der umstehenden Objekte läuft (Abb. 41). Dieses Verhalten war bei Versuchsperson 033 bei Zielpunkt 5, Versuchsperson 036 bei Zielpunkt 3, Versuchsperson 038 bei Zielpunkt 2 und 3 und Versuchsperson 043 ebenfalls bei Zielpunkt 2 und 3 jeweils in der dritten Runde zu beobachten nachdem ein Objekt entfernt wurde.



**Abb. 41: Spiegelfehler von Versuchsperson 036:** Die Trajektorie (schwarz) führt vom Startpunkt (grün) an den Objekten vorbei (blau) zu einem Punkt, der nahe an dem gespiegelten Zielpunkt liegt, anstatt zum eigentlichen Zielpunkt (rot). Die rote Linie stellt die Spiegelachse dar, die durch die beiden Objekte (\*) führt und den Zielpunkt spiegelt (Pfeil). Der grüne Strich gibt die Initialblickrichtung in dieser Phase an. Der Abstand vom End- zum Zielpunkt betrug 0,75 m. Die blau-lila Linien stellen die Blickvektoren der Versuchsperson zum jeweiligen Zeitpunkt auf die Objekte dar. Die unterschiedliche Größe der drei Kreise um den roten Zielpunkt symbolisiert die Salienz der Objekte: groß = hochsalient, klein = niedersalient, mittel = mittelsalient. Am Platz des ausgeblendeten Objekts ist ein leerer Kreis eingezeichnet. Die zeitliche Abfolge ist im Farbverlauf der Blickvektoren dargestellt. Auf der X- und Y-Achse ist die Länge und Breite der Versuchsumgebung in Metern angegeben.

Eine mögliche Erklärung für Verhalten wäre, dass sich die Versuchspersonen in diesen Fällen in der Orientierungsphase eingepägt haben welches Objekt auf der linken und welches auf der rechten Seite von ihnen steht. In der Homingphase jedoch wurden diese beiden Positionen vertauscht, so dass für sie das linke Objekt rechts und das rechte Objekt links stand. Anschließend liefen die Probanden so lange bis diese Anordnung mit der in der virtuellen Welt übereinstimmte. Während diesem

Vertauschen blieb die Information über den eigenen Abstand zu den Objekten erhalten, da die Versuchspersonen in etwa der gleichen Entfernung zu den beiden Objekten ihren Endpunkt angaben.

Bei der Bestimmung des Homingfehlers würden solche Fälle mit einem großen Fehlerwert einfließen. Dieser Fehlerwert entspräche zwar dem Abstand vom End- zum Zielpunkt, würde aber nicht der Leistung der Versuchspersonen entsprechen, da sie durch ihre Annahme, der Zielpunkt befinde sich auf der anderen Seite der Achse, diesen gespiegelten Zielpunkt anliefen. Aus diesem Grund wurden diese Fälle und die entsprechenden Läufe in den anderen Runden aus der Datenauswertung ausgeschlossen (Tab. 5).

VP-Nr.	Ausgeschlossener Zielpunkt	Begründung
031	4	Versuchsperson hat sich verlaufen
032	-	-
033	5	Spiegelfehler
034	-	-
036	3	Spiegelfehler
038	2, 3	Spiegelfehler
041	-	-
043	2, 3, 4	Spiegelfehler, bei Zielpunkt 4 verlaufen
044	-	-
045	-	-
046	-	-

**Tab. 5: Übersicht über ausgeschlossene Daten: In acht Fällen wurden die gemessenen Daten an den Zielpunkten von der Auswertung ausgeschlossen, da sich die Versuchsperson verlaufen hatte oder es zu einem Spiegelfehler kam. Es wurden alle Messwerte der drei Runden des jeweiligen Zielpunkts verworfen.**

## **D Analyse des Trackingfehlers**

Während den ersten Auswertungen des Hauptexperiments zeigte sich ein nicht erklärbares Verhalten der berechneten Blickrichtungen der Versuchspersonen. Laut der automatischen Auswertung gab es immer wieder unvorhersehbare Blicksprünge in den leeren Raum, worauf eine scheinbare Objektverfolgung durchgeführt wurde. Die Videoauswertung offenbarte jedoch, dass zu dem Zeitpunkt weder ein Objekt betrachtet noch so eine Bewegung ausgeführt wurde. Nach vielen Vergleichen zwischen den Videobändern und der automatischen Auswertung hinsichtlich der Abläufe der Augen- und Kopfbewegungen kam der Verdacht auf, dass es eine zeitliche Verzögerung in einer der beteiligten Komponenten gab. Trotz vielfältiger Veränderungen an den Programmdateien für die Auswertung trat keine Verbesserung ein. Aus diesem Grund wurde im nächsten Schritt die Funktionalität des Eyetrackers und Headtrackers untersucht, da es möglicherweise bereits bei der Aufzeichnung zu einem Fehler kam.

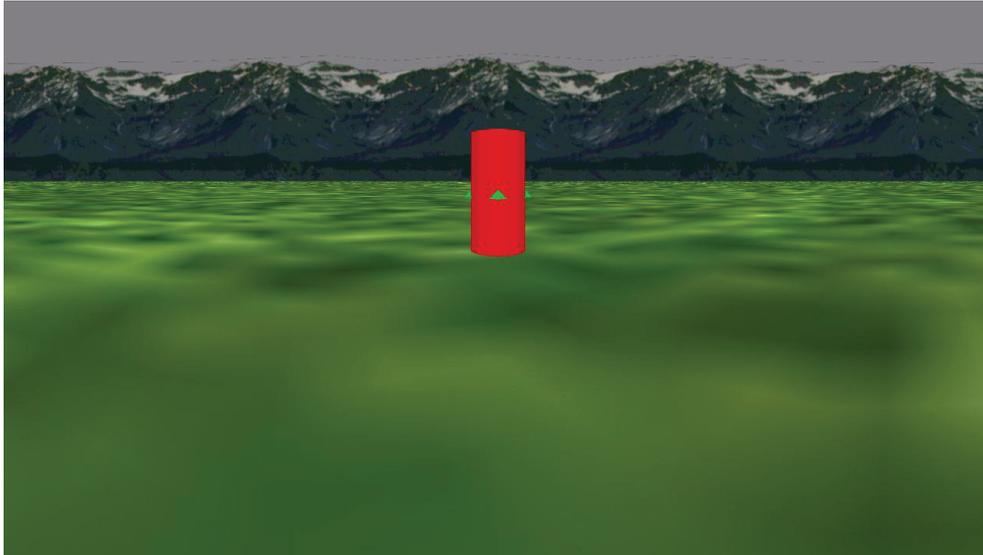
Wenn die Aufzeichnung und Auswertung der Eye- und Headtrackerdaten fehlerfrei funktioniert, dann muss es zu jedem Zeitpunkt eine Übereinstimmung zwischen den betrachteten Objekten im Videofilm und der automatischen Auswertung geben.

### **D 1 Versuch 1**

#### ***D 1.1 Versuchsaufbau***

Für diese Versuchsreihe wurde das Programm des Hauptexperiments geringfügig modifiziert (siehe unten). Das Hauptprogramm selbst war für diesen Versuch nicht geeignet, da es nicht über die entsprechende Verteilung der Objekte verfügte. Ebenso war der Programmablauf auf das Messen von Versuchspersonen ausgelegt und nicht um die Funktionalität des Systems selbst zu überprüfen. Um dennoch eventuell vorhandene fehlerhafte Abschnitte im Programmcode untersuchen zu können, wurden große Programmteile übernommen. Damit war es möglich Rückschlüsse auf Probleme im Hauptprogramm zu ziehen. Geändert wurden die 3D-Umgebung und der Ablauf des Versuches für die Testperson (siehe D 1.2 Versuchsablauf), wohingegen die internen Programmabläufe wie Bilddarstellung, Kommunikation zwischen den Rechnern und Datenaufzeichnung gleich blieben.

Die 3D-Umgebung des Testprogramms hatte ebenfalls die Wiese und das Bergpanorama als Basis; die verschiedenen Objekte wurden jedoch entfernt. Stattdessen wurden einige wenige rote säulenförmige Zylinder mit einem grünen Dreieck in deren Mitte an verschiedenen Orten platziert, so dass immer nur eine Säule auf der Leinwand zu sehen war. Das Dreieck wurde eingefügt, damit ein exakter Fixpunkt für die Personen vorhanden war. Die Säulen waren geringfügig kleiner als die Objekte des Hauptexperiments. Die Versuchsperson stand in der virtuellen Umgebung an einem fixen Punkt vor einer der Säulen. Im Gegensatz zum Hauptexperiment konnte die Versuchsperson keinen Einfluss auf ihre Position in der Welt oder die Bewegungen nehmen (Abb. 42).



**Abb. 42:** 3D-Umgebung des Testprogramms zur Analyse des Trackingfehlers. Zu sehen ist eine der roten Säulen mit dem mittigen grünen Dreieck, welches die Versuchspersonen fixieren sollten. Die Umgebung ist dieselbe, die auch im Hauptexperiment verwendet wurde.

## **D 1.2 Versuchsablauf**

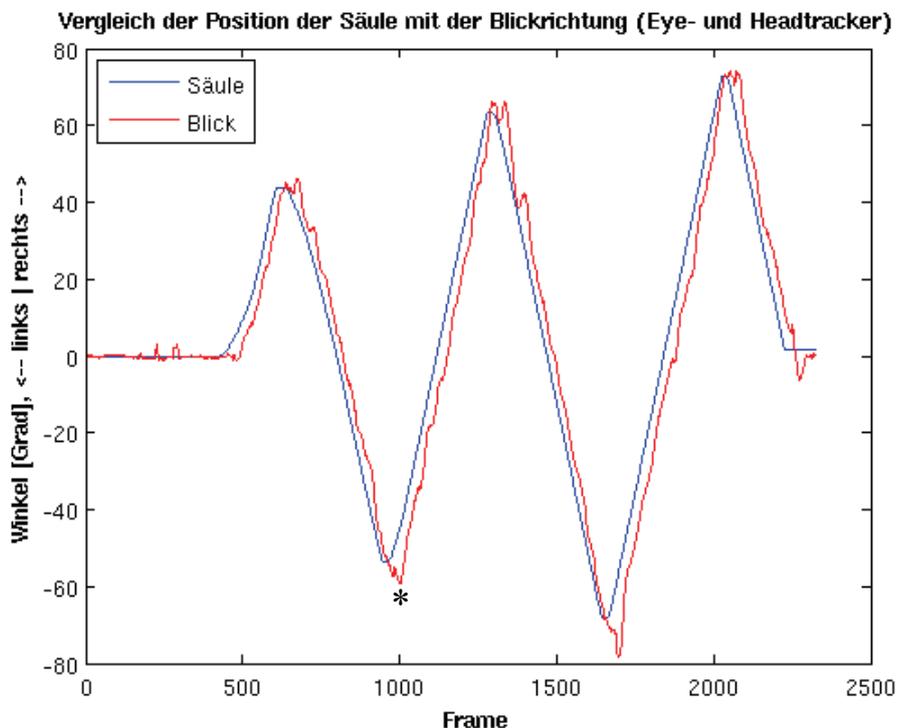
Für den ersten Test sollte die Versuchsperson das grüne Dreieck auf der Säule fixieren und mit den Augen und dem Kopf den Bewegungen der Säule bzw. dem Dreieck folgen. Mit Hilfe eines Joysticks wurde vom Experimentator das virtuelle Heading im Programm verändert, so dass sich die Säule auf der Leinwand alternierend nach links und rechts bewegte.

## **D 1.3 Ergebnisse**

Nach der Datenaufbereitung (siehe C 1.6.2.1 Datenaufbereitung) erfolgte eine Gegenüberstellung der Winkelwerte der Säule (Sollwert, blau) und des Blickwinkels  $\alpha$  in horizontaler Richtung (Istwert, rot), in den sowohl die Werte des Eye- als auch des Headtrackers einfließen. Die Winkel geben die Auslenkung der Säule bzw. des Blickes der Versuchsperson vom Mittelpunkt der Leinwand an. Die Blickrichtung änderte sich entsprechend der Position der Säule, wobei es leichte Schwankungen gab, die auf eine nicht gleichmäßige Bewegung der Augen zurückzuführen ist (Abb. 43). Diese ungleichmäßige Bewegung liegt in der Nachregulierung der Geschwindigkeit der Augenbewegung während des „smooth pursuit“ begründet. Hierbei wird über einen Rückkopplungsmechanismus über mehrere Stationen zwischen Auge und Gehirn eine präzise Augenbewegung gesteuert, bei der ein sich bewegendes Objekt fixiert wird (Thier, Ilg, 2005).

Da die Reaktionszeit der Versuchsperson vor allem bei Bewegungsänderungen eine Verzögerungskomponente darstellte, war mit einem Überschießen(\*) des Blickes an den Scheitelpunkten sowie mit einer geringen Verzögerung beim Bewegungsbeginn zu rechnen. Im direkten Vergleich war eine durchgängige Verschiebung der roten Kurve in X-Achsenrichtung um etwa 30 Frames, abgelesen aus dem Diagramm, zu

erkennen. Erwartet wurde hingegen, dass beide Kurven mit Ausnahme von leichten Schwankungen übereinander liegen. Dies bestätigte die erste Vermutung, dass eine zeitliche Verzögerung in einem der Systeme existierte.



**Abb. 43: Vergleich der Säulenposition mit der Blickrichtung: Der Blick der Versuchsperson (rot) war gegenüber der Position der Säule (blau) in X-Achsenrichtung verschoben. Markiert ist außerdem das Überschießen an einem der Scheitelpunkte (\*). Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad. Positive Werte stellen Bewegungen nach rechts, negative Werte Bewegungen nach links auf der Leinwand dar.**

Um dieses Phänomen weiter zu untersuchen, wurde das Versuchsdesign erweitert und eine getrennte Analyse der beiden Messsysteme durchgeführt.

## D 2 Versuch 2

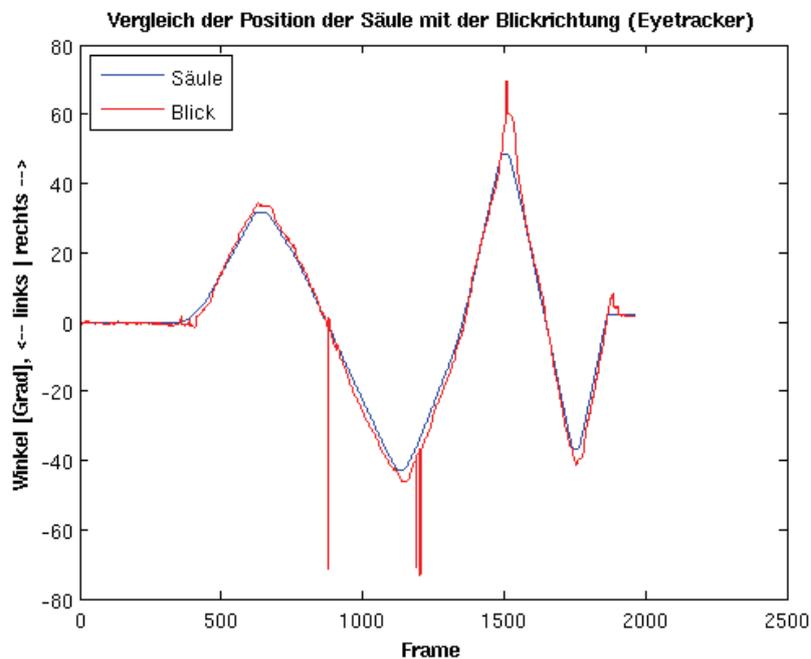
### D 2.1 Versuchsaufbau

Im zweiten Versuch wurden mehrere Wiederholungsphasen eingefügt, in denen die Säule verfolgt werden musste, um die längere Dauer des Hauptexperiments zu simulieren, da möglicherweise ein Einfluss der Versuchsdauer auf das Fehlerverhalten bestand. Zusätzlich wurde die Ausgangsposition der Säule variiert, so dass sie abwechselnd in der Mitte und zu einer Seite hin verschoben stand. Dadurch war es möglich zu untersuchen, ob sich der Fehler in den Randbereichen der Leinwand veränderte. Für die Auswertung wurde die jeweilige Ausgabedatei zunächst wie beim Hauptexperiment in einzelne Phasen geteilt und anschließend aufbereitet (siehe C 1.6.2.1 Datenaufbereitung).

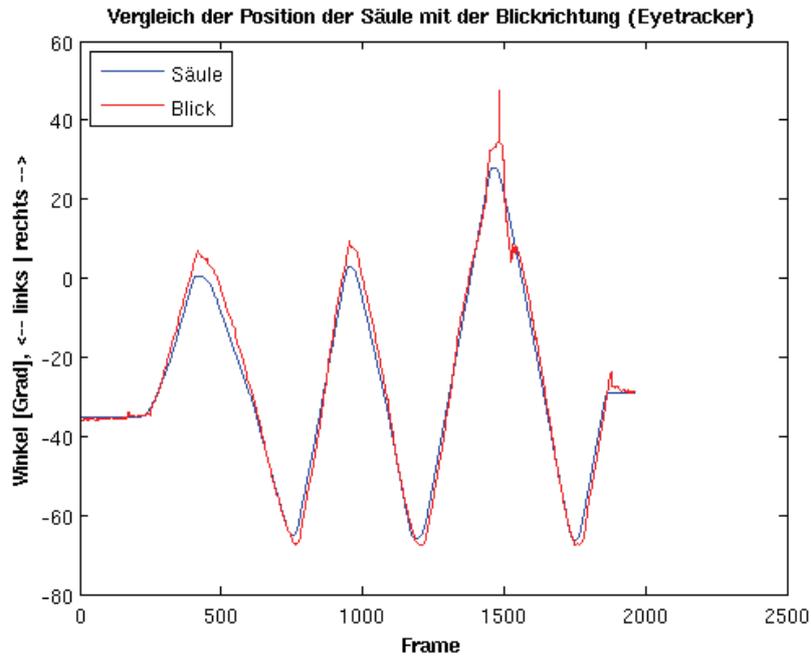
## D 2.2 Analyse des Eyetrackers

Bei der Untersuchung des Eyetrackers wurde die Versuchsperson instruiert den Kopf still zu halten und dem Ziel nur mit den Augen zu folgen. Bei der Auswertung wurden nur die Winkel in horizontaler Ebene betrachtet.

Es war wieder ein Überschießen an den Scheitelpunkten zu beobachten, jedoch keine systematische Verschiebung in X-Richtung (Abb. 44 und Abb. 45). Der Startpunkt befand sich im zweiten Fall auf der linken Seite der Leinwand. Die teilweise vorhandenen und für wenige Frames andauernden Sprünge, vor allem in den negativen, aber auch in den positiven Bereich, erklären sich dadurch, dass nicht die Corneareflexion sondern eine andere Reflexion auf dem Augapfel detektiert wurde. Für nähere Erläuterungen siehe C 1.2.2 Eye- und Headtracking.



**Abb. 44: Vergleich der Säulenposition mit der Blickrichtung des Auges: Die rote Kurve gibt die horizontale Blickrichtung des Auges an und ist bis auf wenige Ausnahmen identisch mit der Position der Säule (blaue Kurve). Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad.**



**Abb. 45: Vergleich der Säulenposition mit der Blickrichtung des Auges: In diesem Fall war der Ausgangspunkt der Säule auf der linken Seite der Leinwand. Auch hier decken sich die Winkelwerte des Auges (rot) mit den Werten der Säule (blau). Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad.**

Die Aufzeichnung der Augenbewegungen mit Hilfe des Eyetrackers kann somit nicht die Fehlerquelle für das in Abschnitt D 1.3 beschriebene Verhalten sein.

### **D 2.3 Analyse des Headtrackers**

Für die Analyse des Headtrackers wurde der Versuchsaufbau nochmals modifiziert, da für die Funktionsprüfung keine Versuchsperson benötigt wurde. Anstelle des Probanden wurde ein Stativ aufgebaut, an dessen oberem Ende sich ein drehbar gelagerter „Kopf“ befand. An diesen Kopf wurden das Headtracktarget und ein Laserpointer angebracht und auf eine Höhe von 1,20 Meter eingestellt (Abb. 46).

Das Testprogramm führte nun selbstständig auf Tastendruck eine Änderung des Headings durch, so dass sich die Säule automatisch auf der Leinwand bewegte. Der Pendelbewegung lag hierbei eine Sinusschwingung zugrunde.

Der Kopf des Stativs wurde mit der Hand nachgeführt, so dass der Laserpointer immer auf die Säule zeigte. Auch hier waren kleine Abweichungen zu Beginn der Bewegung sowie an den Scheitelpunkten der Bewegung zu erwarten, da die Reaktionszeit der Person durch die manuelle Bewegung des Stativkopfes mit einfluss.

Für die Auswertung wurden nur die Winkel in der horizontalen Ebene betrachtet. Auffällig war wieder die Phasenverschiebung der beiden Kurven um diesmal 50 Frames, abgelesen aus dem Diagramm (Abb. 47).

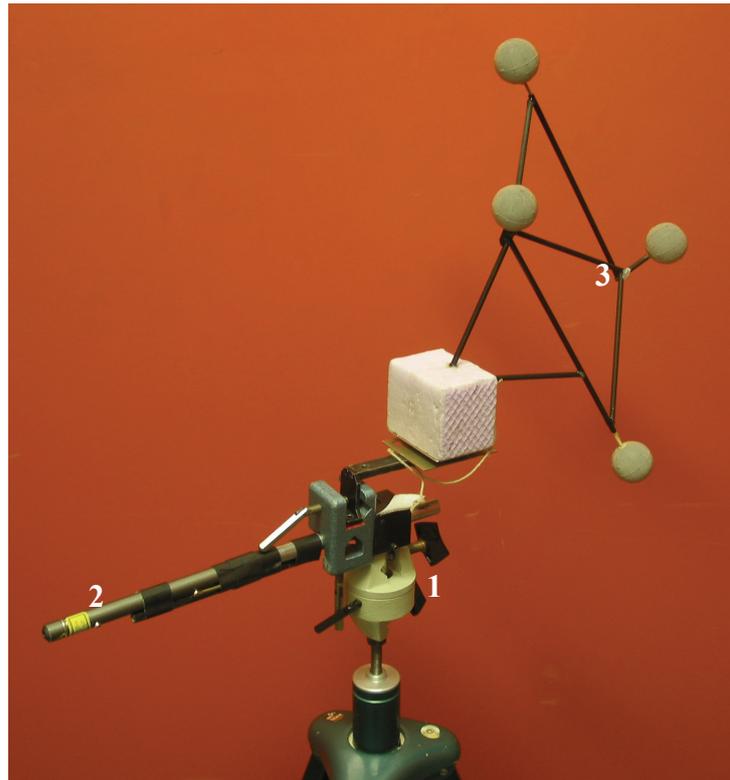


Abb. 46: „Kopf“ des Stativs: Auf dem Drehgelenk (1) waren ein Laserpointer (2) und das Headtracktarget (3) angebracht.

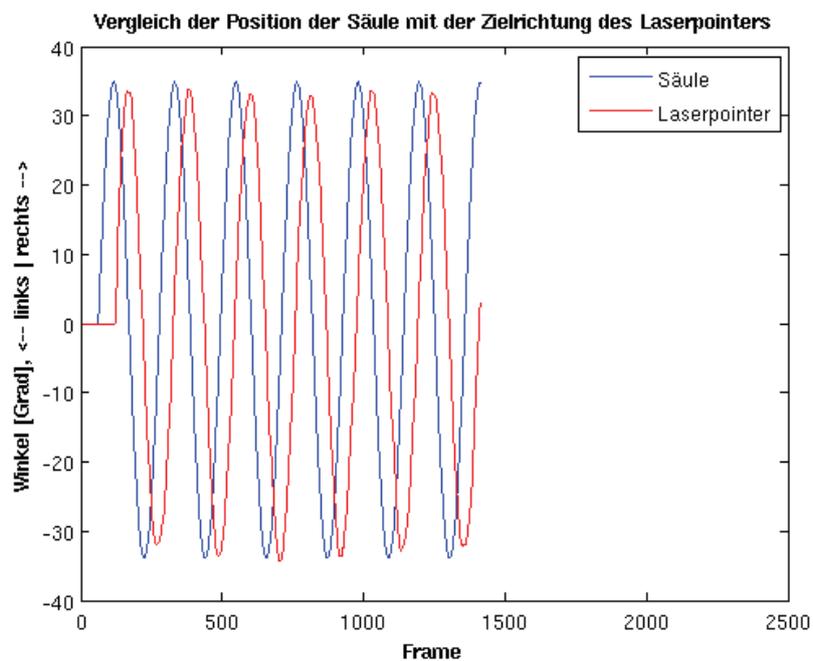
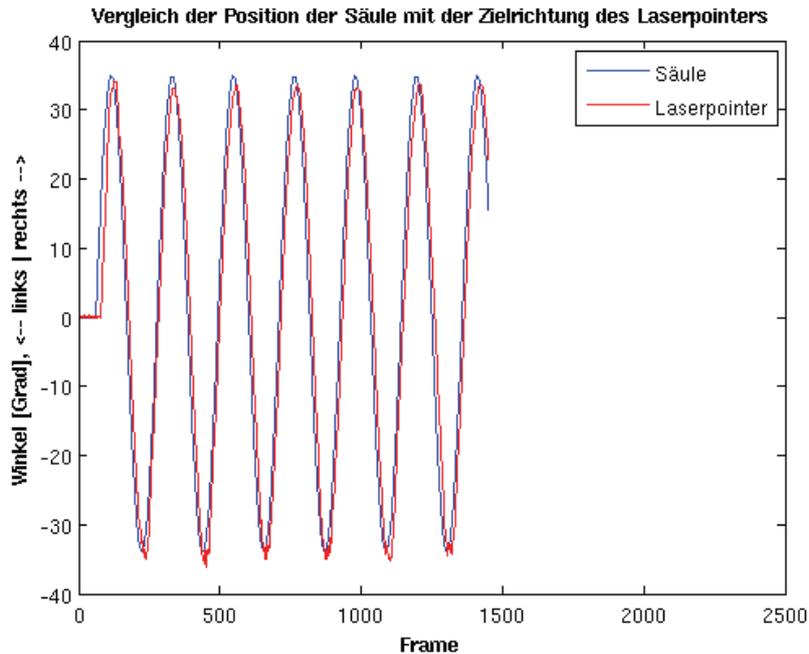
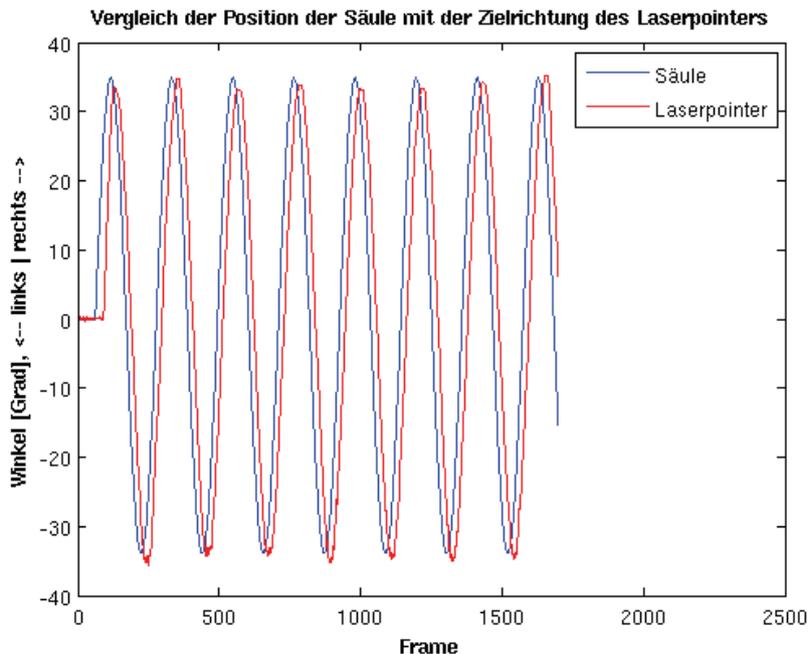


Abb. 47: Vergleich der Position der Säule mit den Werten des Headtrackers. Die rote Kurve des Headtrackers ist wieder in X-Achsenrichtung gegenüber der blauen Kurve der Säule verschoben. Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad.

Bei der Betrachtung von mehreren Versuchsdurchgängen stellte sich heraus, dass die Verschiebung nicht immer den gleichen Betrag hatte, sondern immer größer wurde je länger das Experiment dauerte. In Abb. 48 ist zu sehen, dass zu Beginn die Verzögerung noch sehr gering war. Dargestellt ist die Messung von Runde 2.

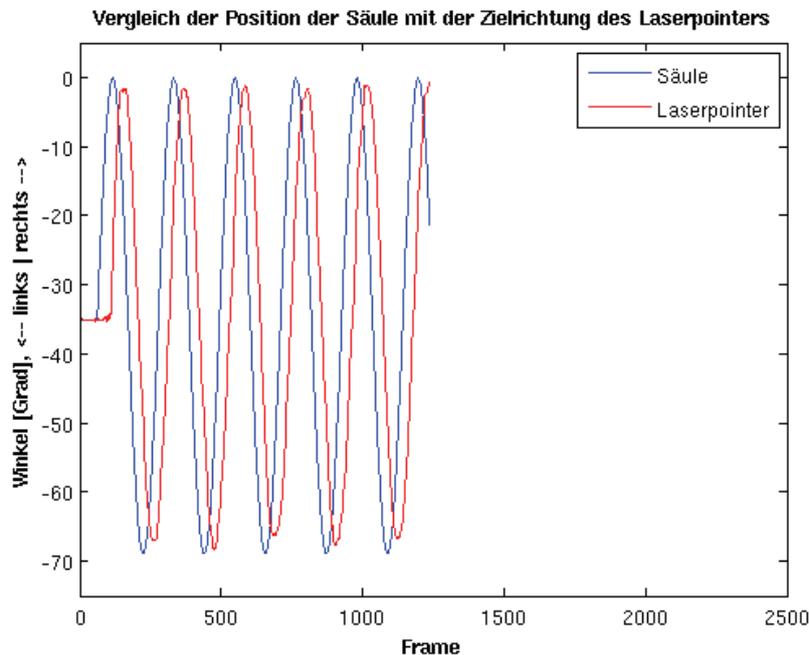


**Abb. 48:** Vergleich der Position der Säule mit den Werten des Headtrackers. Zu Beginn war die Verzögerung des Headtrackers (rote Kurve) noch gering. Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad.



**Abb. 49:** Vergleich der Position der Säule mit den Werten des Headtrackers. Im Verlauf des Experiments wurde die Verschiebung der roten Kurve größer. Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad.

In Runde 6 war die Verschiebung der roten Kurve (Laserpointer) gegenüber der blauen Kurve (Säule) bereits angestiegen (Abb. 49). Diese Verschiebung nahm noch weiter zu, wie aus den Daten von Runde 12 zu sehen ist (Abb. 50).



**Abb. 50:** Vergleich der Position der Säule mit den Werten des Headtrackers. Nach weiteren Wiederholungen hat sich die Verzögerung weiter erhöht. Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad.

### D 3 Ergebnis

Die Untersuchung des Trackingfehlers brachte folgende Ergebnisse:

- Bei der gleichzeitigen Verwendung von Eye- und Headtracker gab es eine positive Verschiebung in X-Richtung und somit eine verzögerte Antwort der Messgeräte.
- Bei Verwendung des Eyetrackers ohne Headtracker war keine Verschiebung festzustellen.
- Bei Verwendung des Headtrackers ohne Eyetracker war eine Verzögerung der Antwort zu beobachten.
- Diese Verzögerung änderte sich über die Zeit, wobei sie umso größer wurde je länger das Experiment dauerte.

Die Tatsache, dass der Fehler bereits bei der Datenaufzeichnung entstand, bedeutete, dass alle bereits durchgeführten Messungen mit diesem Fehler behaftet waren. Da der Fehler nicht konstant war, sondern sich über die Zeit veränderte, war es nicht möglich ihn aus den Daten herauszufiltern.

Aufgrund dieser Erkenntnis mussten die bereits gesammelten Daten verworfen, der Programmteil, der für die Steuerung des Headtrackers zuständig war überarbeitet und im Anschluss daran nochmals neue Messungen durchgeführt werden.

## D 4 Fehlerbehebung

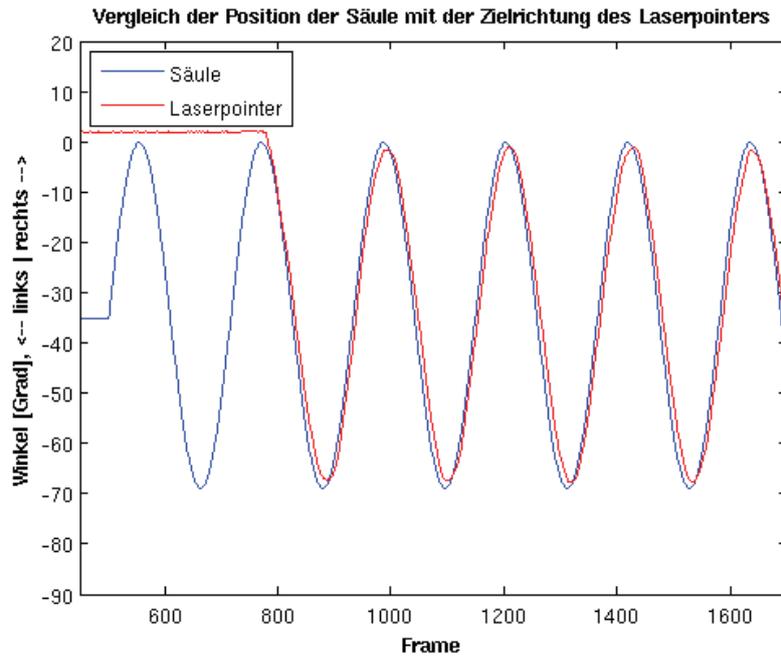
Da es sich bei dem Fehler scheinbar um die Benutzung „alter“ Messwerte handelte, wurden zunächst die Bereiche untersucht, die für das Messen, den Transfer und die Speicherung der Daten zuständig waren. Das Programm der Firma A.R.T. auf dem Headtrackrechner führte laufend eigenständige Messungen durch und übermittelte nach einem Befehl vom Hauptrechner die letzten gemessenen Datensätze. Dieses Programm konnte nicht verändert werden, da es von der Firma selbst entwickelt und programmiert wurde. Auf Nachfrage wurde vom Hersteller jedoch volle Funktionalität zugesichert.

Der Datentransferbefehl des Hauptrechners wurde bei jedem Schleifendurchlauf im Hauptprogramm aufgerufen. Dabei wurden zur Sicherheit zwei Messwerte übermittelt, so dass im Falle einer Kommunikationsstörung, zum Beispiel bei einer Verzögerung im Netzwerk, auf den zweiten Messwert im Speicher zurückgegriffen werden konnte und es zu keinen Messausfällen kam. Allerdings kam es in diesem Speicherbereich durch das Einstellen von zwei Messwerten und dem regulären Auslesen von einem Messwert zu einer Akkumulation von Messdaten. Das Verhalten dieses Bereiches ließ sich nicht komplett aufklären, denn es wurden bei einer Anhäufung nicht die neuesten Daten ausgelesen, sondern ältere Werte benutzt. Ebenfalls stieg der Speicherinhalt nicht linear an, wie aufgrund der „zwei Werte einlesen, ein Wert auslesen“ - Regel zu erwarten gewesen wäre. Insgesamt schien die Veränderung auch mit der Rechnerauslastung in Zusammenhang zu stehen, so dass bei hohem Rechenaufwand die Verzögerung schneller anstieg.

Das Programm wurde daraufhin so abgeändert, dass bei der Kommunikation zwischen den Rechnern immer nur ein Datensatz übermittelt und bei einer Kommunikationsstörung im Ausgabefile im Bereich der Headtrackmesswerte ein Leerwert eingefügt wurde.

Im Zuge dessen wurde auch das Programm für die Datenaufbereitung angepasst, um Datenzeilen mit solchen Ausfällen zu finden und die fehlenden Daten mit Interpolation über den Messwert davor und danach zu ersetzen. Die durchschnittliche Aufzeichnungsrate auf dem Hauptrechner lag bei  $\sim 57$  Hz, das heißt es entstand bei einem Messausfall eine Lücke von 0,0352 Sekunden. Da die Versuchsperson in dieser Zeit keine nennenswerte Änderung ihrer Kopfbewegungen durchführen konnte, kann in diesem Falle eine Interpolation benutzt werden, um die Daten zu rekonstruieren. Bei allen aufgenommenen Daten, sowohl beim Trackingtest als auch später im Hauptprogramm folgten nie zwei Ausfälle aufeinander, so dass bei einem Messausfall nur über einen Frame interpoliert werden musste.

Die Änderung des Kommunikationsverhaltens der beiden Rechner hatte zur Folge, dass nur eine minimale Verzögerung von etwa 5 Frames (entspricht 88 ms) entstand und auch nach längeren Versuchen über mehrere Phasen keine Akkumulation zu beobachten war (Abb. 51). Die rote Linie am Anfang entstand dadurch, dass der Laserpointer erst nach der ersten Säulenschwingung mitgeführt wurde.



**Abb. 51:** Vergleich der Position der Säule mit den Werten des Headtrackers. Mit Hilfe des neuen Programmcodes war die Verschiebung der Kurven nur minimal. Auf der X-Achse ist die Versuchsdauer in Frames aufgetragen, auf der Y-Achse die Winkel in Grad. Positive Werte stellen Bewegungen nach rechts, negative Werte Bewegungen nach links auf der Leinwand dar.

Es war nicht möglich eine exakte Übereinstimmung ohne Verzögerung zu erhalten, weil die Messung durch die Infrarotkameras, die Übertragung zum Headtrackrechner, die Übergabe an das Trackingprogramm und das Versenden über das Netzwerk eine geringe Zeit benötigte und somit die systematisch bedingte Grenze erreicht war.

## **E Manuelle und automatische Auswertung**

Bei der Analyse von Blickverhalten von Versuchspersonen wurden bisher meist keine automatischen, sondern manuelle Auswertungen durchgeführt. Da in dieser Diplomarbeit eine computergestützte Auswertung ihre Anwendung finden sollte, musste sichergestellt werden, dass diese Auswertungsmethode verlässlich das Blickverhalten von Personen darstellen kann. Dazu wurde ein Vergleich zwischen der manuellen Videoauswertung und der automatischen Computerauswertung durchgeführt, mit der sich nun dieses Kapitel befasst.

### **E 1 Digitalisierung**

Für die manuelle Videoauswertung wurde zunächst der Videofilm, der während zweier Versuche aufgenommen wurde, mit Hilfe des Programms Adobe Premiere 6 digitalisiert. Die Auflösung während der Aufnahme am PC lag bei 720 x 576 Pixeln und 25 Bildern pro Sekunde. Der digitalisierte Film wurde anschließend entsprechend der einzelnen Trials und Phasen des Experiments geschnitten und als MPEG-4 komprimierte AVI-Dateien mit einer Auflösung von 400 x 300 Pixeln und 25 Bildern pro Sekunde gespeichert.

Der Videorecorder zeichnet jedoch bei der Aufnahme durch das Interlacingverfahren 50 Halbbilder pro Sekunde auf, so dass eine höhere zeitliche Auflösung und somit feinere Abstufung bei der Bewegung vorhanden war. Um diese höhere Auflösung wieder zu erhalten, wurde im Anschluss der Film mit dem Programm VirtualDUB bearbeitet und die Einzelbilder in zwei vollständige Bilder geteilt. Der dadurch entstandene Film hatte eine zeitliche Auflösung von 50 „Vollbildern“ pro Sekunde.

### **E 2 Auswertung des Films**

Für die weitere Auswertung wurden die einzelnen Teile des Videofilms mit einem Matlabscript geöffnet und Bild für Bild ausgewertet (Abb. 52). Entsprechend der Position des Fadenkreuzes wurde für jedes getroffene Objekt, für den Hintergrund oder bei Messausfällen eine Nummer eingegeben. Abschließend erhielt man dadurch eine Abfolge von Nummern, die der zeitlichen Abfolge des Blicks der Versuchsperson entsprach. Es wurde hierbei der Film einer Versuchsperson komplett ausgewertet und einige Stichproben von den Versuchsphasen des anderen Probanden herausgezogen.

Bei der automatische Auswertung wurden die Daten des Headtrackers und des Eyetrackers nach dem Zerlegen in die einzelnen Phasen miteinander verrechnet (siehe C 1.6.2.1 Datenaufbereitung). Anschließend wurde wie im Hauptexperiment eine Blickvektoranalyse durchgeführt (siehe C 1.6.2.2 Blickvektoranalyse). Am Ende erhielt man auch hier eine Liste von Objektnummern, die der Abfolge des Blicks auf die Objekte entsprach.



**Abb. 52: Anzeige- und Eingabefenster des manuellen Auswertungsprogramms:** Links wurden Einzelbilder des digitalisierten Videofilms gezeigt (1). Rechts oben wurde die aktuelle Framenummer angezeigt (2). In das Eingabefeld (3) wurde die Nummer des Objekts eingegeben, auf dem das Fadenkreuz zu diesem Zeitpunkt lag. Unten rechts wurde zur Kontrolle die zuletzt eingegebene Nummer angezeigt (4).

### E 3 Vergleich der beiden Auswertungsmethoden

Für den Vergleich der beiden Methoden wurden zunächst beide Ausgabedateien der manuellen und automatischen Auswertung mit Matlab eingelesen. In die Liste, die von der automatischen Auswertung erstellt wurde, wurden die zuvor vermerkten Messausfälle (Headtracker / Eyetracker / außerhalb Leinwand) als Leerzeilen an ihrer entsprechenden Position wieder eingefügt und im Falle des Headtrackers die Zeit über die Stellen interpoliert. Ohne dieses Auffüllen würden Lücken im Ablauf des Versuchs entstehen, bei denen die Versuchsperson einen „Zeitsprung“ im Experiment machen würde und ein Abgleich mit dem Videofilm, bei dem es diese Sprünge nicht gab, wäre unmöglich. Des Weiteren war eine Angleichung des Datenvolumens notwendig, da die unterschiedlichen Aufzeichnungsraten von 50 Hz beim Videofilm und durchschnittlich 57 Hz auf dem Rechner eine unterschiedlich große Datenmenge hervorbrachte. Dazu wurden die Daten des Rechners an das Volumen des Films angeglichen, indem jeder Datenzeile des Videofilms die zeitlich am besten passende Zeile der automatischen Auswertung zugeordnet wurde. Nachfolgend wurden in beiden Listen die Zeilen gelöscht, bei denen die Videoauswertung keine verwertbaren Daten lieferte. Dazu zählen wie bei der automatischen Auswertung der Lidschlag der Versuchsperson beziehungsweise eine nicht detektierbare Corneareflexion oder Pupille und zusätzlich, wenn der Blick der Versuchsperson außerhalb des Aufnahmebereichs der Videokamera war.

Die soweit aufbereiteten Listen konnten nun gegenübergestellt werden. Ein Einzelbildvergleich zeigte eine Übereinstimmung der beiden Auswertungsmethoden von durchschnittlich 56 %. Dabei gab es Phasen, bei denen die Übereinstimmung bis zu 75 % betrug. Bei der Betrachtung größerer Abschnitte über mehrere Bilder hinweg zeigte sich, dass beide Methoden im etwa gleichen Zeitraum das gleiche detektierte Objekt ausgaben. Die Unterschiede beruhten hauptsächlich auf unterschiedliche Anfangs- bzw. Endpunkte der Abschnitte, in denen dasselbe Objekt betrachtet wurde und auf Unterbrechungen, bei denen für wenige Bilder ein anderes Objekt detektiert wurde. Wie aus dem Trackingtest bekannt, gab es bei der Aufzeichnung der Headtrackerdaten eine systembedingte Verzögerung von einigen Frames, die hier die Verschiebung der Abschnitte erklärt. Vor allem bei häufigen und schnellen Kopfbewegungen und nur kurzen Objektfixationen entstand eine größere Diskrepanz zwischen der manuellen und automatischen Auswertung, da die Überlappung der Abschnitte, in denen beide Methoden das gleiche Objekt detektierten, im Verhältnis zu den Unterschieden kleiner wurde.

### **E 4 Diskussion**

Bis zur Gegenüberstellung der Listen und dem Vergleich der Einzelbilder sind viele Schritte der Datenaufbereitung notwendig. In jedem Schritt sind kleine Ungenauigkeiten möglich, die letztendlich bei der Einzelbildgegenüberstellung zu unterschiedlichen Objekten führen können. Aus diesem Grund ist es sinnvoller größere Abschnitte in den Listen zu betrachten, um eine verlässliche Aussage über die Genauigkeit der automatischen Auswertung zu erhalten. Für die Auswertung des Hauptexperiments wird die Blickabfolge mit der Position der Versuchsperson zum jeweiligen Zeitpunkt in Bezug gesetzt. Solange die Abfolge an sich und ihre Dauer keine Abweichungen aufweisen, ist es zu vernachlässigen, wenn eine geringe Zeitverzögerung von einigen hundertstel bis zehntel Sekunden bei der Blickabfolge zu verzeichnen ist, da der Proband in dieser kurzen Zeit nur eine minimale Positionsänderung in der virtuellen Welt durchführen kann.

Die manuelle Videoauswertung hat den Vorteil, dass die Komponente des Headtrackers und somit eine zusätzliche Fehlerquelle nicht vorhanden ist. Man hat außerdem die Möglichkeit einen schnellen Überblick über die Augenbewegungen der Versuchsperson während des Versuchs zu bekommen, ohne dass eine zeitintensive Aufbereitung der Daten notwendig ist, indem man das Video bei normaler Geschwindigkeit betrachtet. Des Weiteren muss man auf die Videoauswertung zurückgreifen, wenn der Versuch in der realen und nicht in einer virtuellen Welt stattfindet, da keine digitale Repräsentation der Umgebung vorliegt, die für eine automatische Auswertung notwendig ist.

Die Nachteile der manuellen Auswertung liegen vor allem im stark begrenzten Sichtfeld der Szenenkamera, der analogen Aufnahmetechnik und dem Zeitaufwand für die Auswertung. Die analoge Videoaufnahmetechnik beinhaltet ein Bildrauschen, welches sich durch die Digitalisierung, Videokomprimierung und dem Aufteilen der Halbbilder in zwei Vollbilder weiter verstärkt. In Kombination mit der niedrigen Auflösung (400 x 300 Pixel) ist es bei der Auswertung durch eine Person nicht immer möglich exakt den Blick der Versuchsperson und damit das betrachtete Objekt zu bestimmen. Des Weiteren benötigt die manuelle Einzelbildanalyse sehr

viel Zeit, so dass für die Auswertung eines 30 minütigen Films einer Versuchsperson in etwa mit 10-14 Stunden zu rechnen ist.

Die automatische Auswertung benötigt dem gegenüber in etwa die gleiche Zeit wie der Versuch selbst, da während der Auswertung der Ablauf des Versuchs nachgestellt wird. Die Zeit für die Datenaufbereitung ist vernachlässigbar. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist das große Sichtfeld, welches berücksichtigt werden kann. Das Auswertungsprogramm verwendet die gleichen Anzeigeparameter wie das Versuchsprogramm, so dass die gesamte Fläche der Anzeige zur Datenauswertung herangezogen werden kann und es keinen Randbereich gibt, der nicht erfasst werden kann. Dies ist insbesondere bei der Verwendung einer Leinwand, die große Bereiche des Sehfeldes abdeckt und somit ein natürliches Blickverhalten begünstigen soll von großem Vorteil.

Durch die digitale Aufzeichnung kommt es bei jedem Verarbeitungs- und Auswerteschritt zu keiner Verschlechterung der Datenqualität.

Die Nachteile der automatischen Auswertung liegen unter anderem beim Headtracker, durch den eine zusätzliche Komponente und damit potenzielle Fehlerquelle eingeführt wird (siehe auch D Analyse des Trackingfehlers). Während der Datenaufbereitung und -auswertung sind viele Programmschritte nötig, in denen weitere mögliche Fehlerquellen liegen.

Da in unserem Fall die Übereinstimmung der Abschnitte in den Listen größtenteils gegeben war und die positiven Argumente der automatischen Auswertung überwogen, wurde für die Auswertung des Hauptexperiments diese Methode verwendet.

## **F Abschließende Diskussion**

Ziel des Experiments war einen Einfluss der Salienz von Objekten auf die Augenbewegungen nachzuweisen und eine Methode zu finden, um die Nutzung bestimmter Landmarken bei einer Wegfindeaufgabe feststellen zu können.

Anhand der Versuchsergebnisse wurde belegt, dass das Ausblenden von Objekten in der Nähe des Zielpunktes wie erwartet zu einer Verschlechterung in der Zielpunktfindung führte. Durch die Aufteilung in verschiedene Salienzklassen anhand der Fixationsanzahl lässt sich dieser Effekt genauer beschreiben. Um die Aufgabe zu erfüllen, werden die Objekte durch die Probanden selektiert. Von allen zur Verfügung stehenden Objekten werden nur bestimmte ausgewählt und memoriert, nämlich die, die der Versuchsperson für die Lösung der Aufgabe hilfreich erscheinen. Diese Landmarken reichen aus, um die geforderte Aufgabe zu erfüllen. Auch innerhalb dieser Auswahl gibt es eine Abstufung in mehr oder weniger „wichtige“ Landmarken. Je wichtiger eine Landmarke war und je weniger Alternativen sich die Versuchsperson gemerkt hatte, desto schlechter kann sie den Zielpunkt finden wenn jenes Objekt fehlt; was schließlich die Eingangshypothese belegt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch eine Studie von Sabine Gillner, Anja Weiß und Hanspeter A. Mallot im Jahr 2007, wenngleich in dem Versuch keine konkreten Objekte vorhanden waren. Auch in jenem Experiment führte das Fehlen beziehungsweise Abschwächen von wichtigen Informationen über die Position des Zielpunktes zu einer schlechteren Zielpunktfindung.

Betrachtet man die Salienz der Objekte vom Salienztest und dem Hauptexperiment, so ist zu sehen, dass sie sich bei einigen Objekten stark ändert. Das Kamel, an das sich die Versuchspersonen während des Salienztests am schlechtesten erinnern konnten, wurde während des Hauptexperiments sechs Mal als hochsalient eingestuft. Der Hase wurde beim Salienztest in 21 von 22 Fällen als bekannt eingeteilt, beim Hauptexperiment hingegen war er nur drei Mal hochsalient, sechs Mal mittelsalient und sogar zwei mal niedersalient.

Die Salienz der Objekte ändert sich also je nach Aufgabenstellung. Auch andere Studien kommen zu dem Schluss, dass die Aufgabenstellung und der Kontext die Blickrichtung von Versuchspersonen bestimmen (Rothkopf, Ballard, Hayhoe, 2007). Während des Salienztests wurde den Objekten keine Funktion zuteil, wohingegen sich die Probanden beim Hauptexperiment an ihnen orientieren mussten. Die unterschiedliche Salienz je nach Aufgabenstellung belegt auch, dass ein Einfluss der „top-down“-Verarbeitung vorhanden ist. Würde eine reine „bottom-up“-Verarbeitung angewendet werden, so dürfte es keinen Unterschied zwischen dem Salienztest und dem Hauptexperiment hinsichtlich der Salienz der Objekte geben. Die unterschiedlichen Farben und Formen der Objekte bedingen jedoch auch immer eine „bottom-up“-Verarbeitung, da sie, unabhängig von der Aufgabe, die Aufmerksamkeit unterschiedlich stark auf sich ziehen.

Einen Einfluss auf die Salienz der Objekte und die Einteilung in die Salienzgruppen hat auch die Auswahl und Verteilung der Objekte in der Umgebung. Je nachdem welche Objekte wie an einem Zielpunkt gruppiert sind, ergeben sich andere

Möglichkeiten für die Versuchspersonen. Durch eine Variation im Aufbau der virtuellen Umgebung würden den Objekten andere Salienzen zugewiesen werden. Die Einteilung in die drei Salienzgruppen im Hauptexperiment erfolgte anhand der Fixationsanzahl. Parallel wurde auch die Fixationsdauer betrachtet, doch führte eine Einteilung hinsichtlich dieses Kriteriums, im Gegensatz zur Fixationsanzahl, zu keinen Unterschieden zwischen den Salienzgruppen. Vermutlich wird während einer langen Fixationsdauer die Charakteristik des fixierten Bereichs genauer „untersucht“, jedoch kann nur durch viele Blickwechsel das gesamte Objekt, beziehungsweise beim Wechsel zwischen mehreren Objekten deren Abstand voneinander „erfasst“ werden.

Die Bestimmung der Salienz anhand der Fixationen berücksichtigt leider nicht, dass Objekte auch in der Peripherie des Sehfeldes wahrgenommen werden. Dadurch ist es den Versuchspersonen möglich Objekte zu memorieren, ohne dass dies vom Eyetracker aufgezeichnet und bei der Auswertung berücksichtigt werden kann. Leider gibt es keine Technik, die die Informationsaufnahme durch peripheres Sehen aufzuzeichnen vermag.

Ein weiterer Nachteil an der in diesem Versuch verwendeten Salienzeinteilung ist, dass sie erst nach dem Experiment stattfindet. Es müssen bereits vor Beginn des Versuchs die auszublendenden Objekte definiert sein, ohne zu wissen welche Salienz ihnen zugeordnet werden wird beziehungsweise ob die Versuchsperson sie überhaupt betrachtet. Eine große Verbesserung wäre in diesem Fall eine „online“-Analyse, die bereits während des Versuchs die Augenbewegungen auswertet, um dann in der letzten Runde die entsprechenden Objekte auszublenden. Dies hätte den Vorteil für jede Versuchsperson individuell gleich viele Landmarken aus den Salienzgruppen zu testen.

Der Vergleich zwischen dem Homingfehler und dem prozentualen Anteil an Fixationen auf das auszublendende Objekt zeigte, dass die Versuchspersonen vermutlich zwei unterschiedliche Strategien benutzt haben (Abb. 34 bis Abb. 37). Im einen Fall steigt der Homingfehler mit dem prozentualen Anteil an Fixationen an. Die Probanden waren hierbei nicht in der Lage das Fehlen von Informationen über die Zielpunktposition, das durch das Ausblenden von Objekten ausgelöst wurde, auszugleichen. Im anderen Fall bleibt der Homingfehler trotz steigendem Fixationsanteil nahezu gleich. Die Versuchspersonen waren in der Lage, das Fehlen der Information auszugleichen. Mit welchen Mitteln sie dies erreichen ist aus dem Experiment nicht zu erklären. Möglicherweise waren sie in der Zeit, in der sie die anderen Objekte, die nicht ausgeblendet wurden, fixiert haben aufmerksamer und haben sich deren Positionen „besser“ gemerkt.

Eine weitere Möglichkeit liegt in der Nutzung zusätzlicher Informationen, die aus dem Leinwandaufbau hervorgehen. Es ist möglich, die Abstände von Objekten zu schätzen, indem sich die Versuchsperson so lange um die eigene Achse dreht bis ein Referenzobjekt auf dem Leinwandrand liegt. Ausgehend davon können nun die Positionen der anderen Objekte abgeschätzt und memoriert werden. Diese Strategie hat den Vorteil, dass eine geringere Gedächtnisleistung benötigt wird, da die Größe und der Abstand der Objekte nur in Bezug zur Position, bei der das Referenzobjekt auf dem Rand liegt, gesetzt werden müssen. Diese Strategie ist ein Artefakt aus der Benutzung der virtuellen Realität, denn in einer natürlichen Umgebung sind derartige Ränder nicht vorhanden.

Eine andere Strategie nutzt die Verdeckung von Objekten aus. Es ist möglich die Position sehr genau wieder zu finden, indem sich der Proband merkt, welche weiter entfernten Objekte durch nähere verdeckt werden. Diese Strategie setzt jedoch voraus, dass die Versuchsperson ein Wissen über den Aufbau der Umgebung und zumindest der ungefähren Position der Objekte hat. Sehr einfach hat es der Proband in den Fällen, in denen ein Objekt nur teilweise verdeckt ist. Er kann somit ohne ein Wissen über die Umgebung die Verdeckung nutzen, um seine Position bestimmen zu können. Trotz großem Aufwand war es aufgrund der großen Versuchsumgebung, den vielen Objekten und Zielpunkten nicht immer möglich eine Teilverdeckung von Objekten auszuschließen.

Weiterhin könnten die Versuchspersonen manche Objekte auch nur deshalb angeschaut haben, weil sie sie „interessant“ fanden oder diese durch die „bottom-up“-Verarbeitung die Aufmerksamkeit auf sich zogen. Wenn das Objekt parallel dazu zumindest eine mäßige Funktion bei der Navigation erfüllte, so kann es wegen den vielen Fixationen in eine höhere Salienzgruppe eingestuft werden, ohne dass das Objekt bei der Zielpunktfindung tatsächlich solch eine hohe Priorität hat. In den entsprechenden Fällen wäre die Versuchsperson durchaus in der Lage auch beim Ausblenden des Objekts den Zielpunkt mit einem geringen Fehler zu finden.

Eine mögliche Änderung für zukünftige Versuche wäre die Nutzung von „virtuellem Nebel“, indem ab einem bestimmten Abstand von der Versuchsperson der Kontrast des Bildes abnimmt und mit zunehmender Entfernung immer schwächer wird. Dadurch würden weiter entfernte Objekte schlechter oder gar nicht mehr sichtbar sein, so dass die Versuchspersonen auf die nahen Objekte angewiesen sind. Auch die vorher angesprochene Informationsaufnahme über die Peripherie des Sehfeldes ließe sich dadurch in bestimmten Situationen einschränken.

Die Nutzung der Leinwandränder als Hilfsmittel zur Entfernungs- und Winkelabschätzung ließe sich nur durch die Verwendung einer größeren Projektionsfläche, die weit hinter das Sehfeld der Versuchsperson reicht, ausschließen. Alternativ wäre ein so genanntes „head mounted display“ (HMD) mit integriertem Eyetracker zu empfehlen, das einen Rundumblick ohne seitliche Ränder und gleichzeitig eine Aufzeichnung der Blickrichtung ermöglicht.

Im Zusammenhang mit den bei einigen Versuchspersonen auftretenden Spiegelfehlern stellt sich die Frage, welche eingangs erwähnten Navigationsmechanismen Anwendung gefunden haben. Einfachste Mechanismen wie die Taxis können ausgeschlossen werden, da keine entsprechenden Stimuli eingesetzt wurden. Auch Navigationsmechanismen, die ausschließlich auf der Verwendung eines Arbeitsgedächtnisses beruhen sind vernachlässigbar. Versuchspersonen sind zwar in der Lage mittels optischem Fluss Wegintegration zu betreiben (Kearns, Warren, Duchon, Tarr, 2002), jedoch kann dieser Mechanismus bei diesem hier verwendeten Paradigma keine verlässlichen Informationen über die Lage des Zielpunkt liefern, selbst wenn sich die Probanden die in Runde 1 und 2 gelaufene Strecke eingeprägt haben sollten.

Da am Zielpunkt selbst keine Markierung angebracht war und er sich nur aus der Konfiguration der Objekte finden lies, sind die beiden Mechanismen *Suche* und *Zielanfahrt* keine probaten Mittel um den Punkt direkt zu finden. In beiden Fällen muss die Landmarke am Ziel beziehungsweise das Ziel selbst erkennbar sein.

Für die Zielpunktfindung werden die Versuchspersonen höchstwahrscheinlich die *Zielführungsstrategie* verwendet haben. Die *Zielanfahrt* könnte später eine Rolle in Verbindung mit der *Wegweisung* eingenommen haben, indem mit ihr zuerst auffällige Objekte als Zwischenziele angesteuert wurden, um im Anschluss mit der *Zielführungsstrategie* zum Zielpunkt zu gelangen.

Eine schnappschussbasierte Navigation hat, wie bereits erwähnt, den Vorteil, dass die kognitive Last gering gehalten wird, da keine Objekterkennung erfolgen muss. Das Auftreten der Spiegelfehler jedoch spricht gegen die reine schnappschussbasierte Navigation, die auf dem Vergleich zwischen memoriertem und aktuellem Retinabild basiert, da es bei den Spiegelfehlern offenbar zu einem Vertauschen der Objekte kam. Das Vertauschen würde bei dieser Navigationsstrategie auffallen, da die beiden Retinabilder nicht zueinander passen würden.

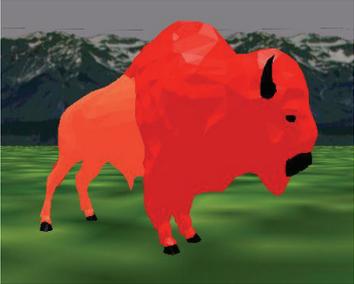
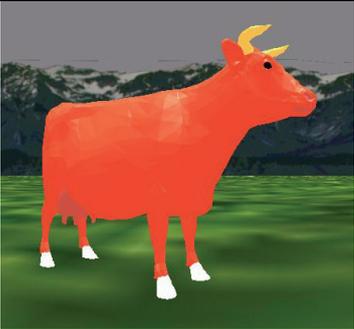
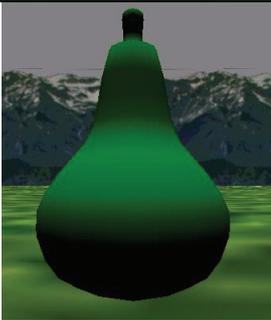
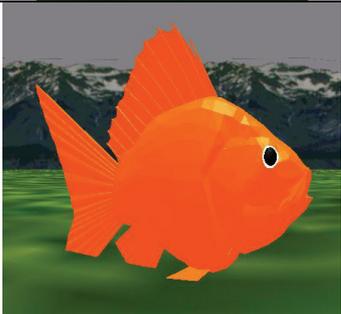
In einem weiteren Versuch könnte auch hier durch den Einsatz von virtuellem Nebel das Auftreten von Spiegelfehlern untersucht werden, um somit Aufschluss über die verwendete Strategie zu geben.

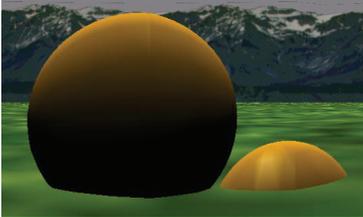
Abschließend lässt sich sagen, dass die hier verwendete Methode, der Analyse der Augenbewegungen bei der Orientierung an Objekten, in der Lage ist, die Auswahl und Nutzung von hochsalienten Landmarken in einer Wegfindaufgabe zu bestimmen.

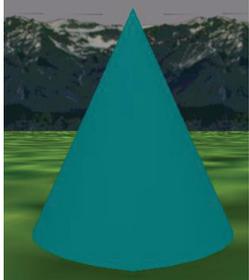
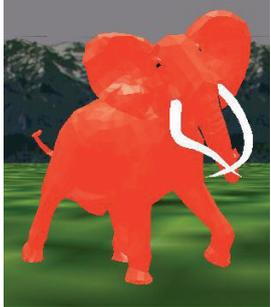
## G Anhang

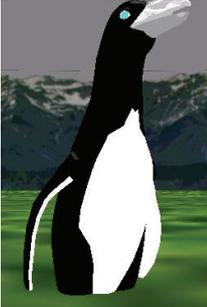
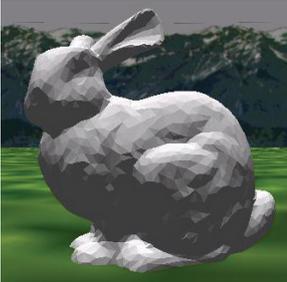
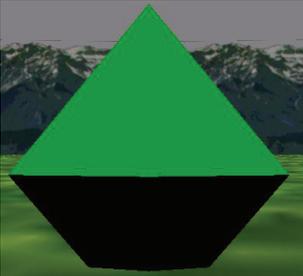
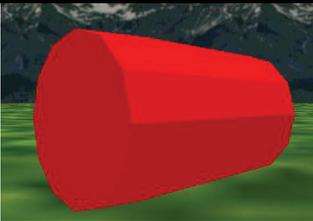
### Übersicht über die verwendeten Objekte

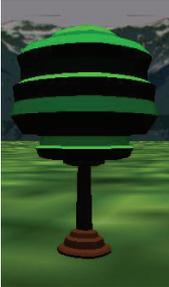
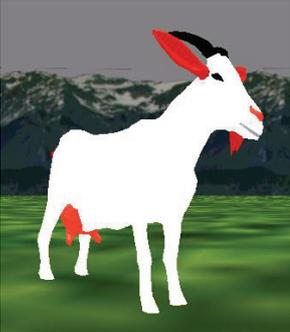
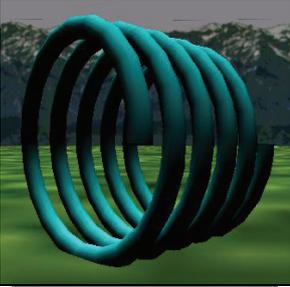
Für den Salienztest wurden alle Objekte verwendet, wohingegen für das Hauptexperiment nur die Objekte 2-22 genutzt wurden.

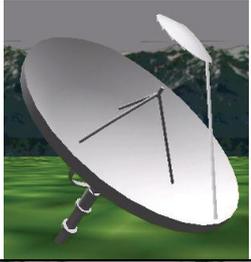
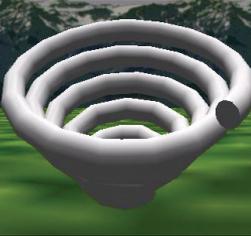
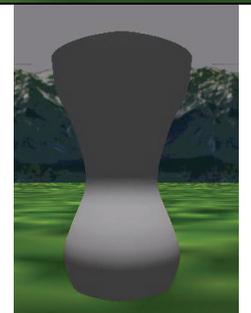
Objektnummer	Objektname	Bild
2	Büffel	
3	Ferkel	
4	Kuh	
5	Birne	
6	Goldfisch	

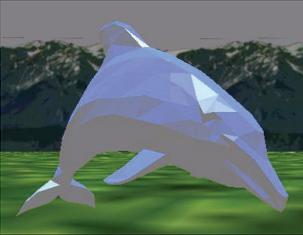
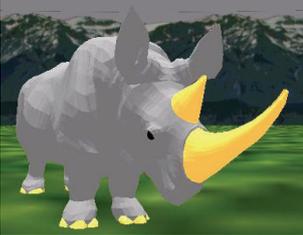
7	Ente	
8	Schneemann	
9	Wildschwein	
10	Käse	
11	Mühle	
12	Katze	

13	Löwe		
14	Kegel		
15	Kugel		
16	Elefant		
17	Flasche		
18	Bär		

19	Kamel		
20	Pinguin		
21	Hase		
22	Pyramide		
23	Zylinder		
24	Hund		

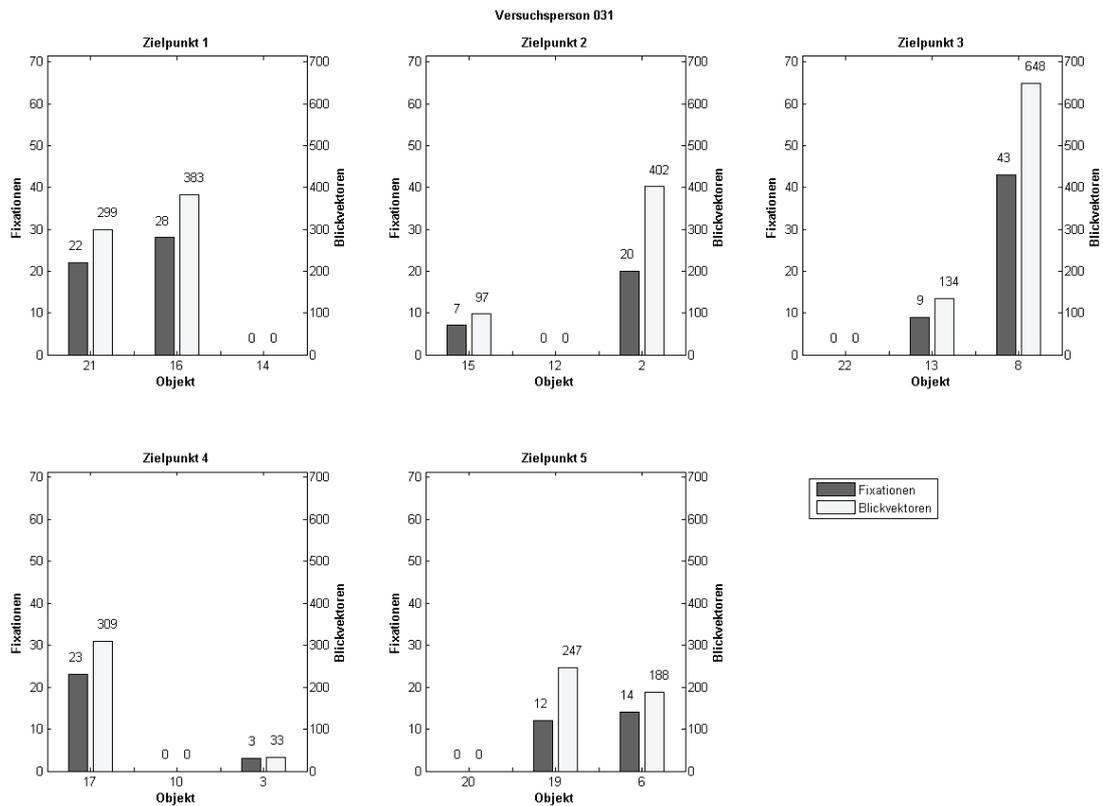
25	Baum		
26	Ziege		
27	Helix		
28	Pferd		
29	Baustein		
30	Hirsch		

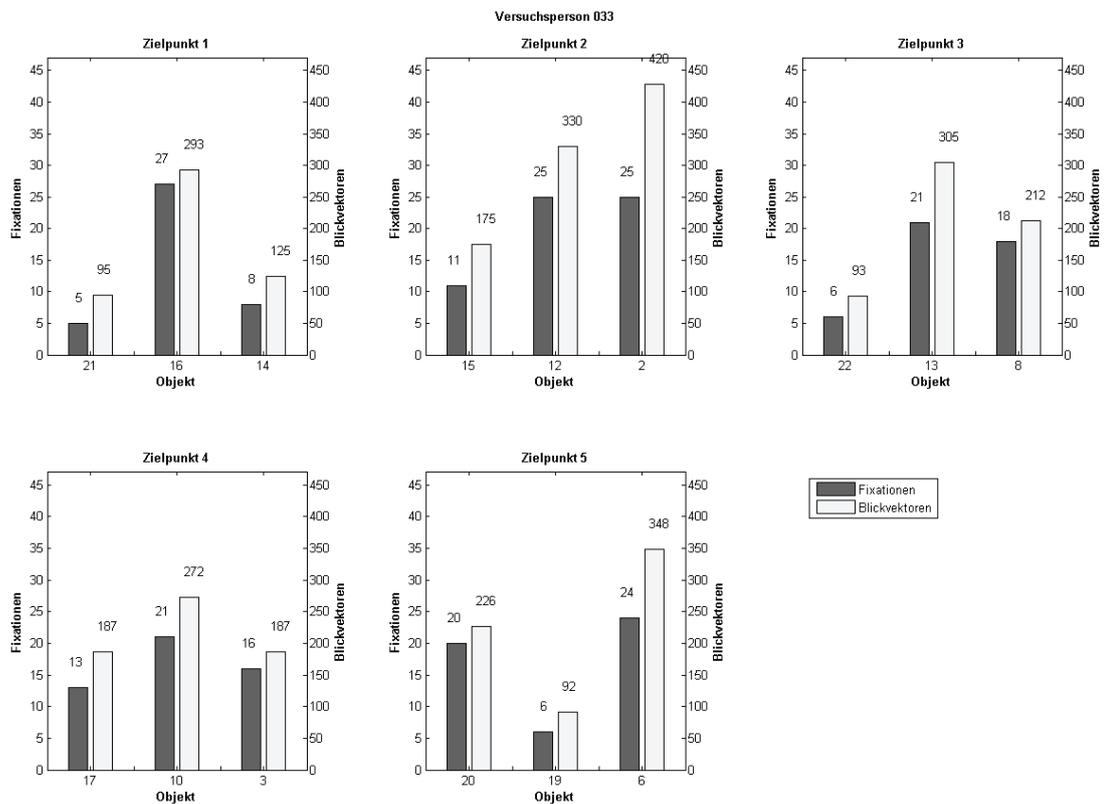
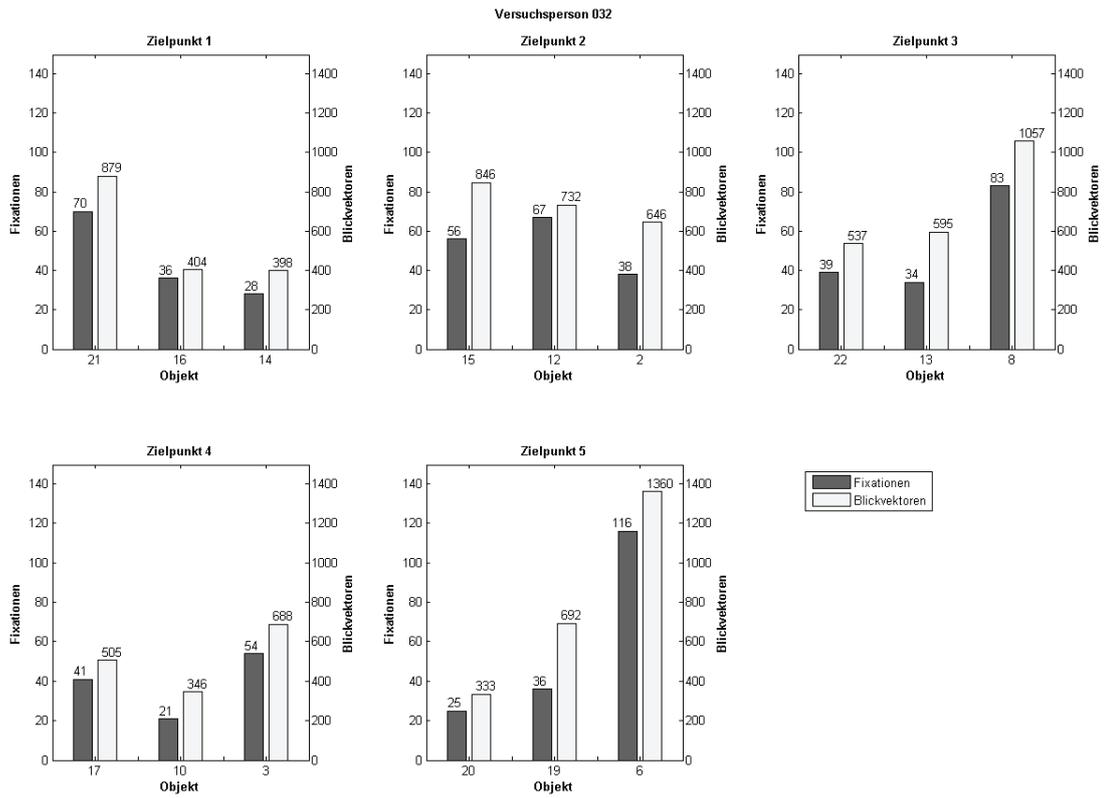
31	Ratte	 A 3D rendered red rat with black whiskers and a black nose, standing on a green field.
32	Antenne	 A 3D rendered white satellite dish antenna on a tripod stand, set against a background of a green field and mountains.
33	Spirale	 A 3D rendered white spiral object, resembling a spring or a decorative element, on a green field.
34	Tisch	 A 3D rendered blue table with a round top and a thick, tapered leg, on a green field.
35	Tiger	 A 3D rendered yellow tiger with black stripes, standing on a green field.
36	Schildkröte	 A 3D rendered turtle with a black shell and white limbs, on a green field.
37	Vase	 A 3D rendered grey vase with a wide opening and a narrow neck, on a green field.

38	Affe	
39	Hai	
40	Büste	
41	Delfin	
42	Stier	
43	Nashorn	

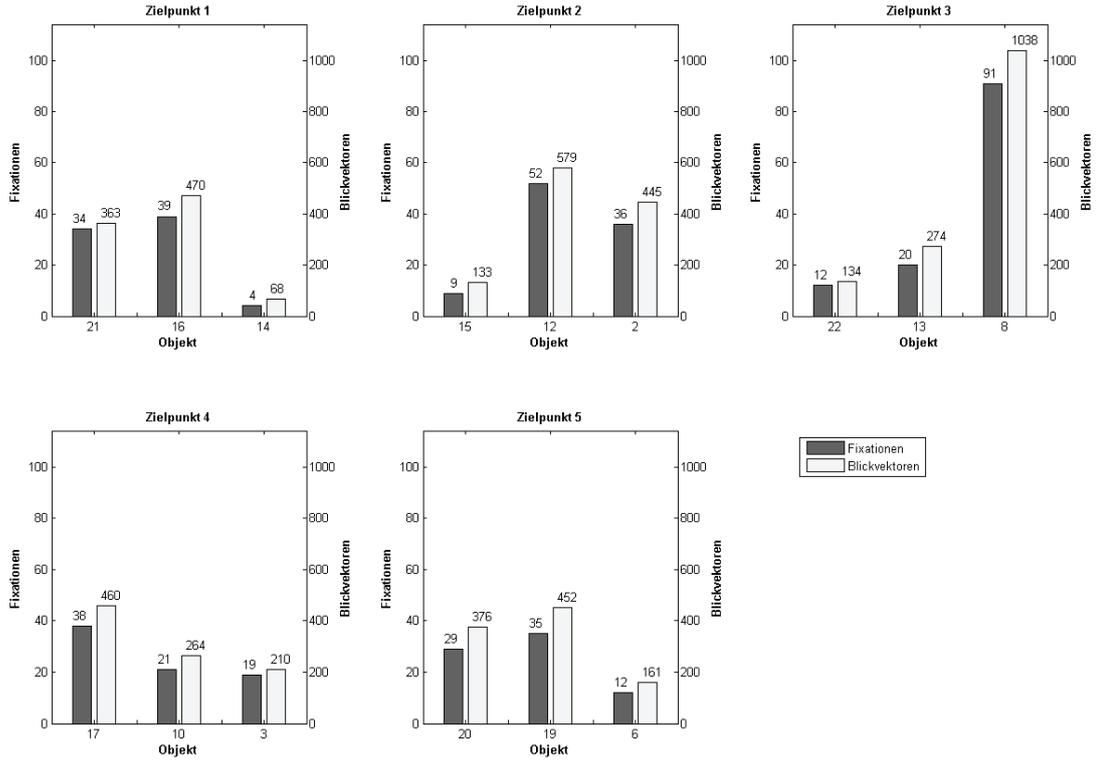
## Salienzeinteilung

Für jede Versuchsperson wurde an jedem Zielpunkt die Salienz der umstehenden Objekte definiert, indem jedes Objekt anhand der Fixationsanzahl (dunkle Balken, linke Skala) in eine Salienzgruppe eingeteilt wurde. Zusätzlich sind noch die Blickvektoren (helle Balken, rechte Skala) eingetragen. Auf der X-Achse sind die Objekte durch ihre Nummern dargestellt (Liste der Nummernzuordnung siehe oben).

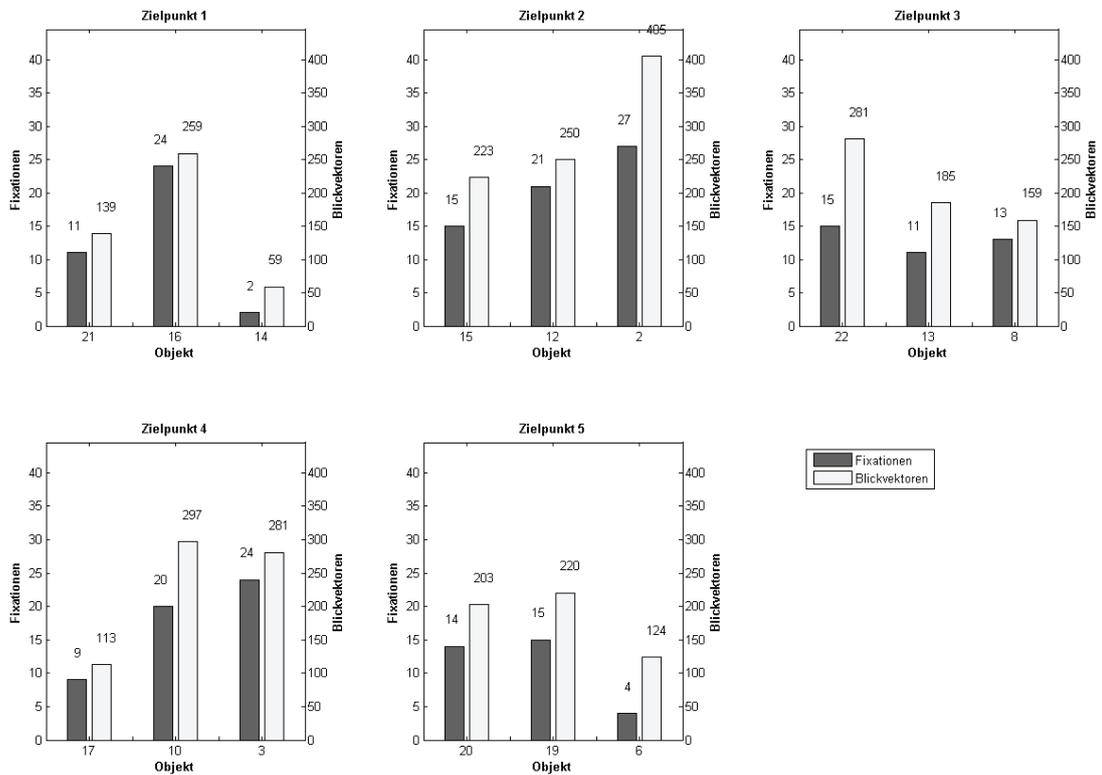


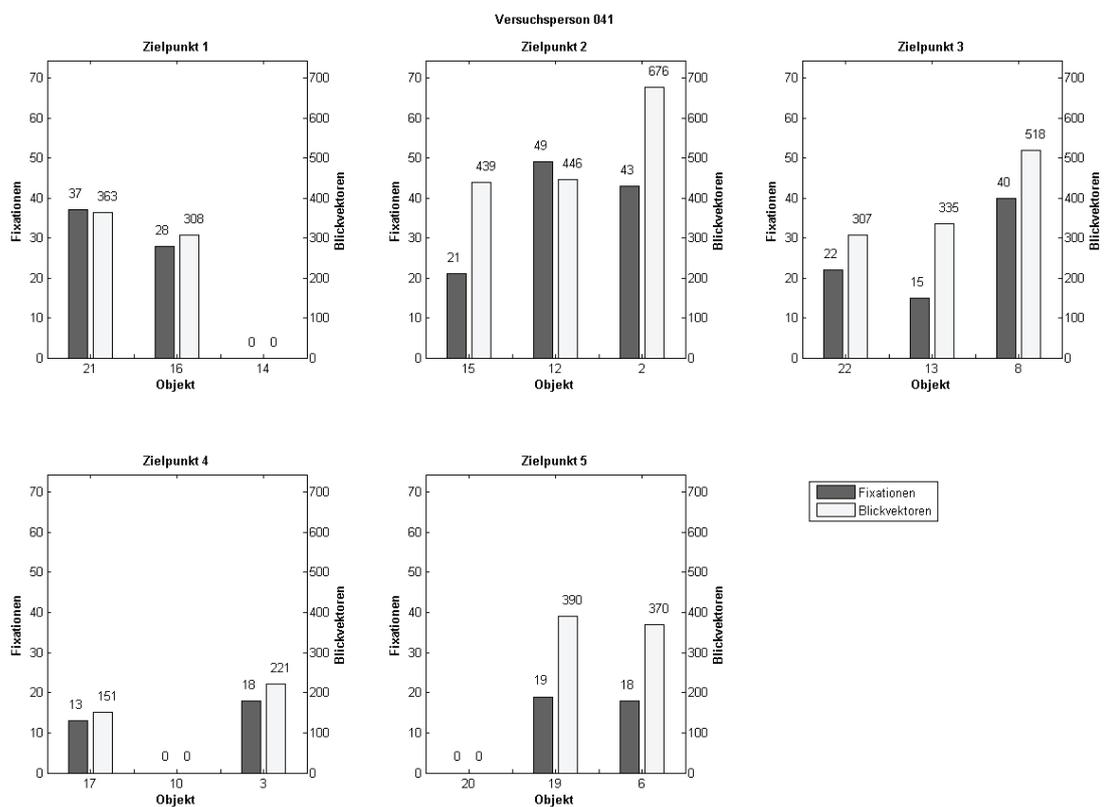
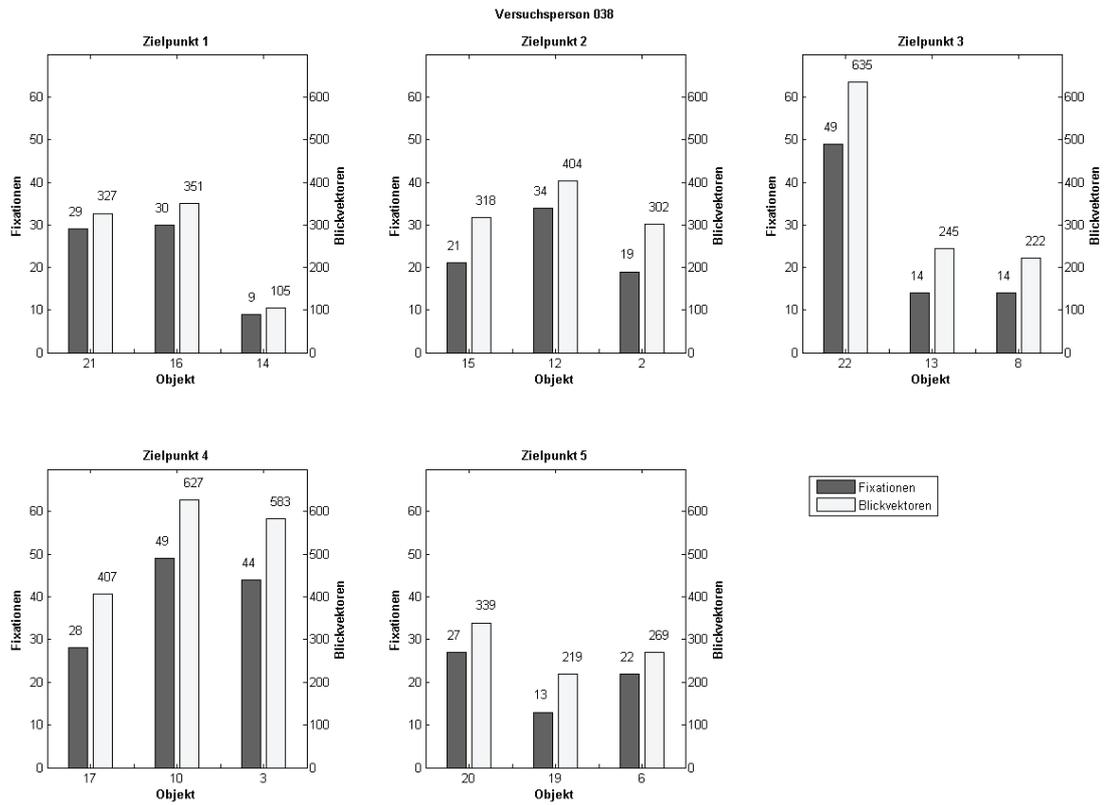


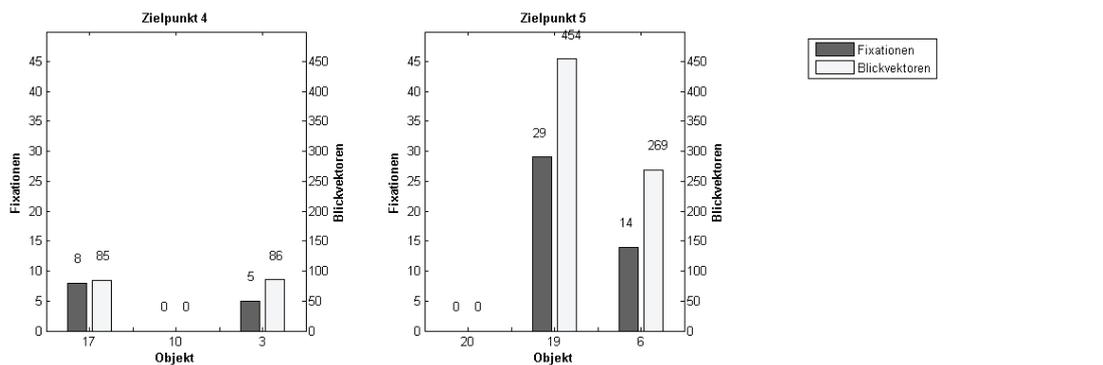
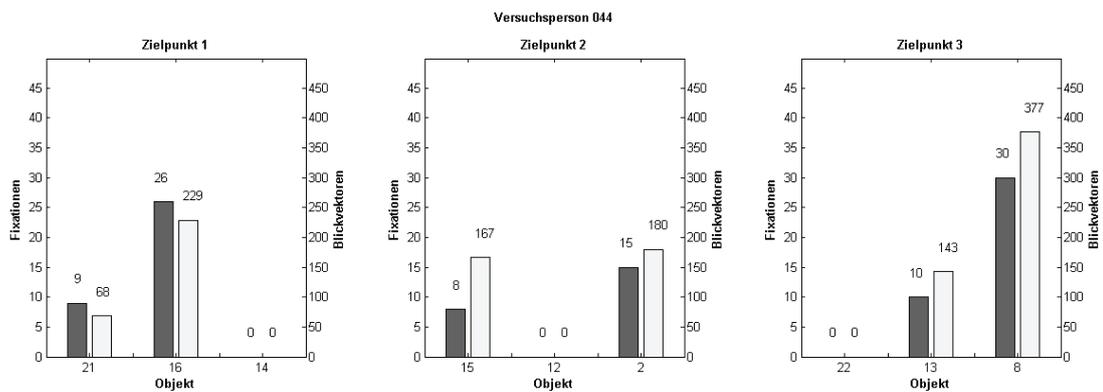
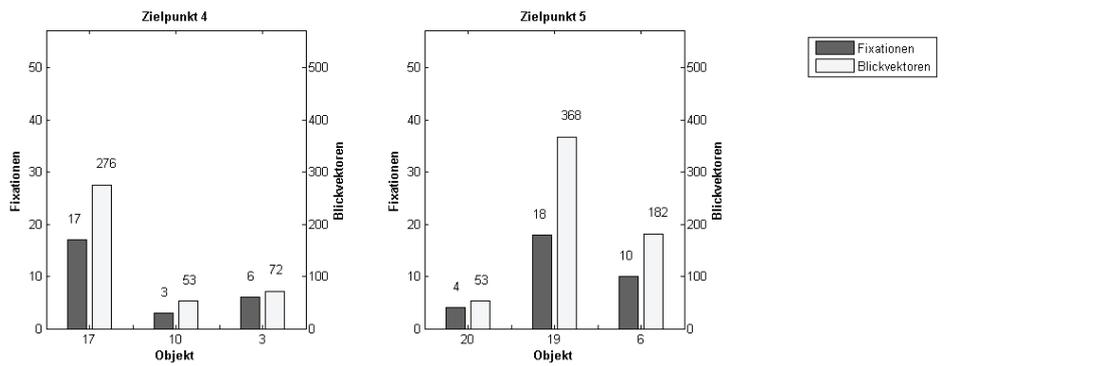
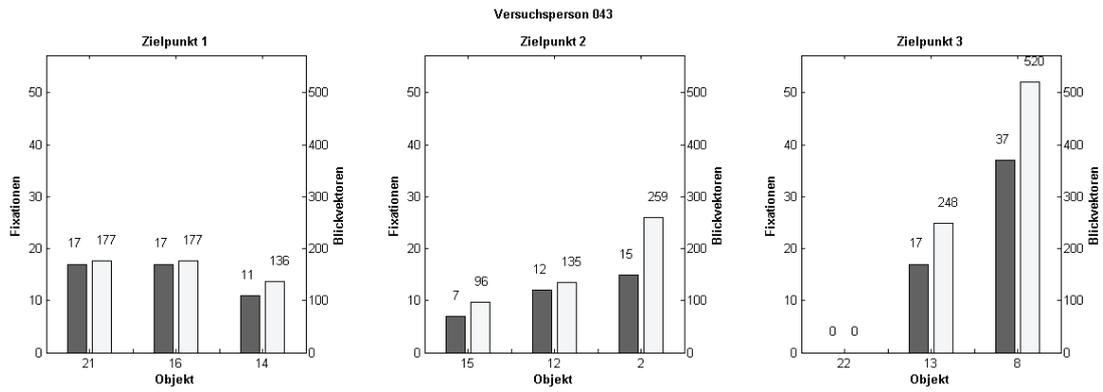
Versuchsperson 034

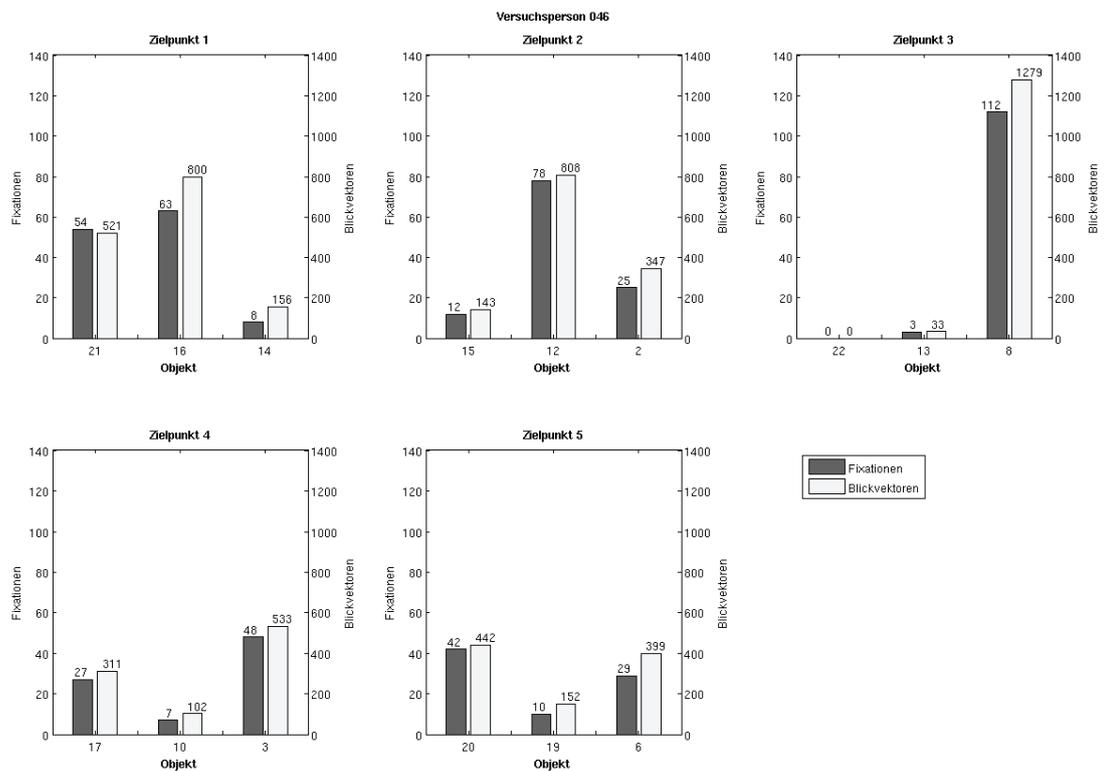
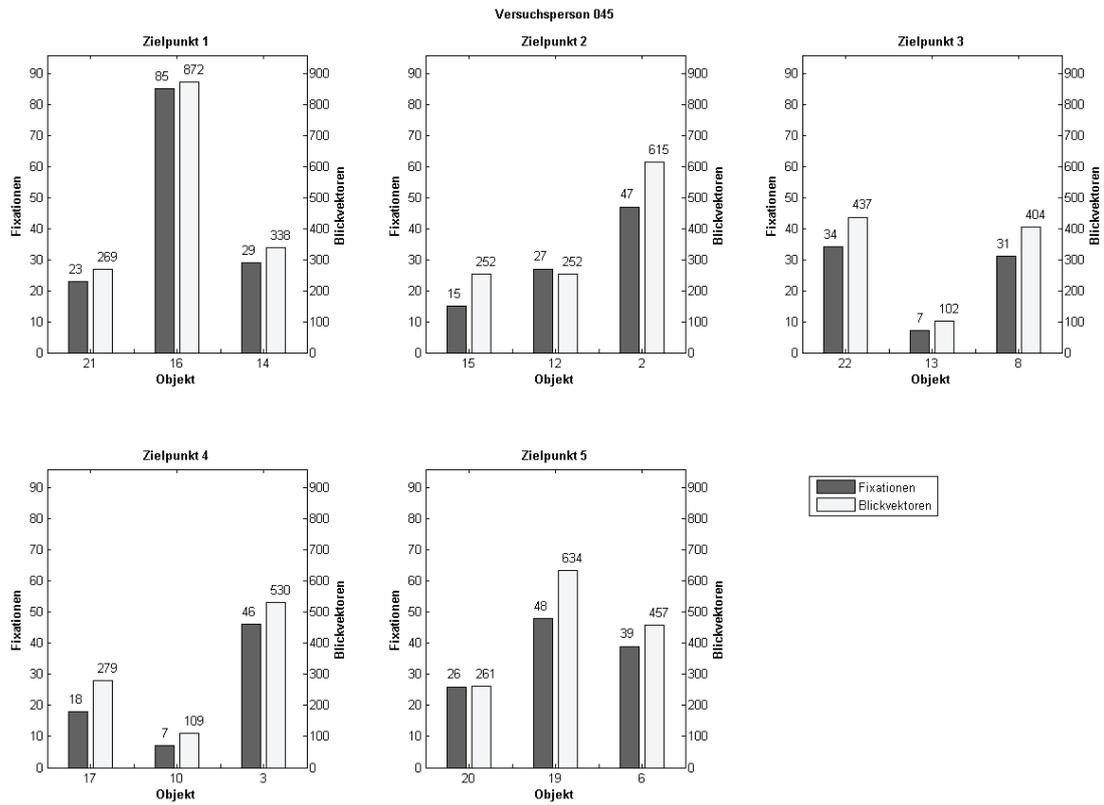


Versuchsperson 036





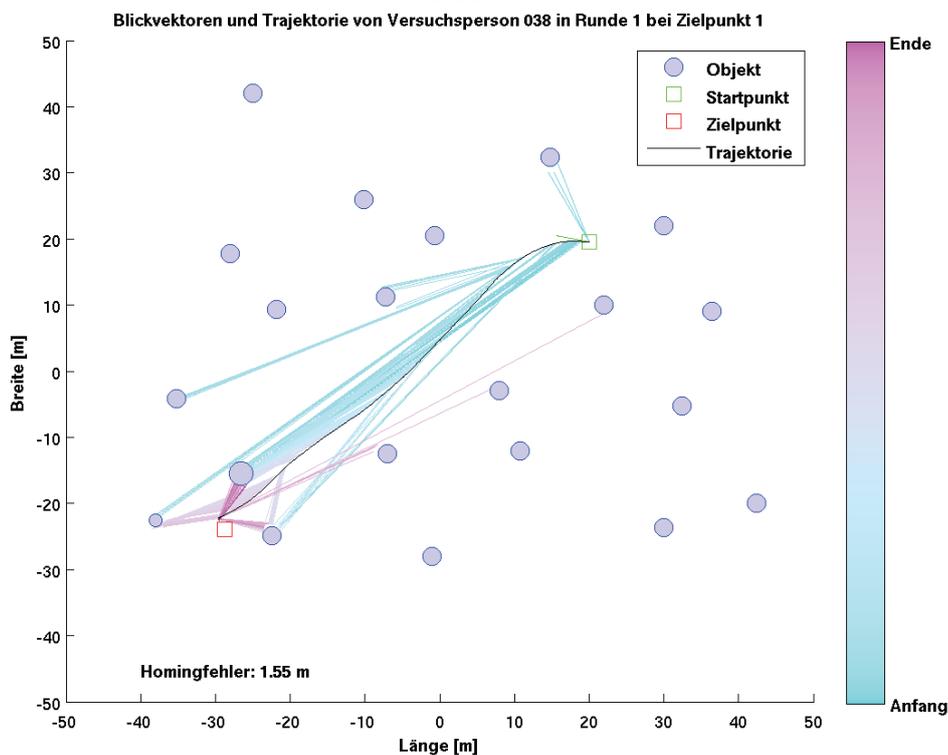
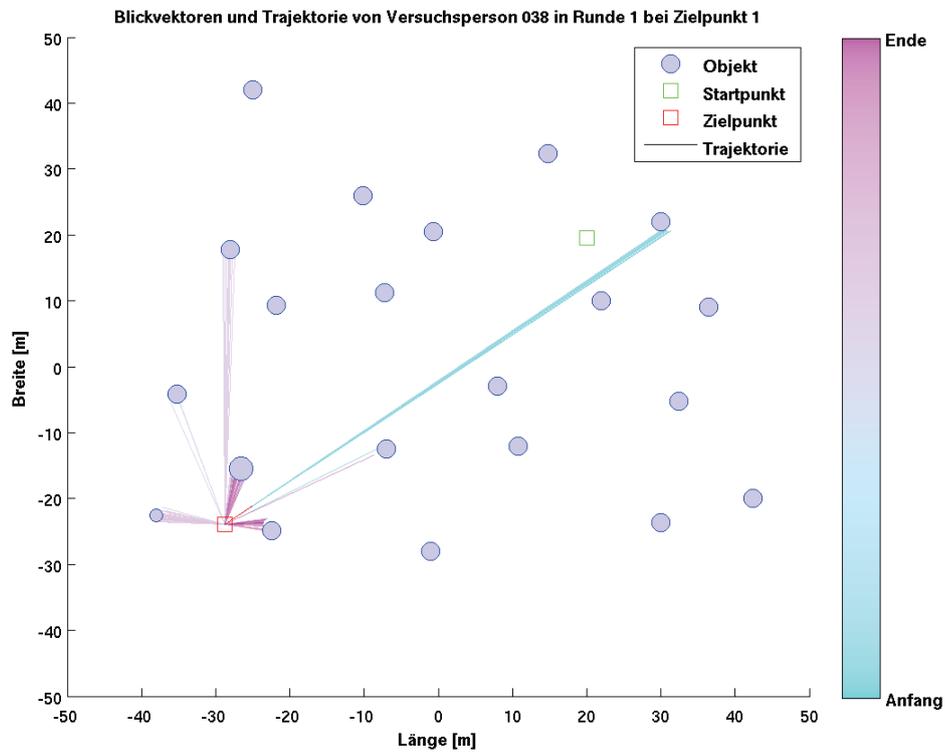


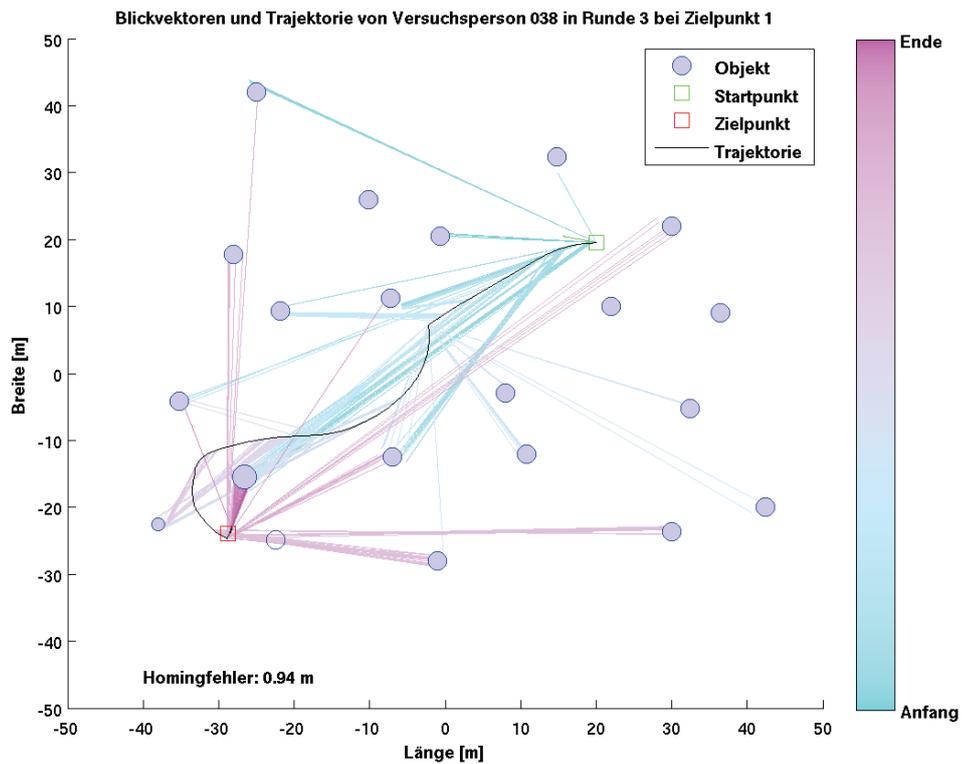
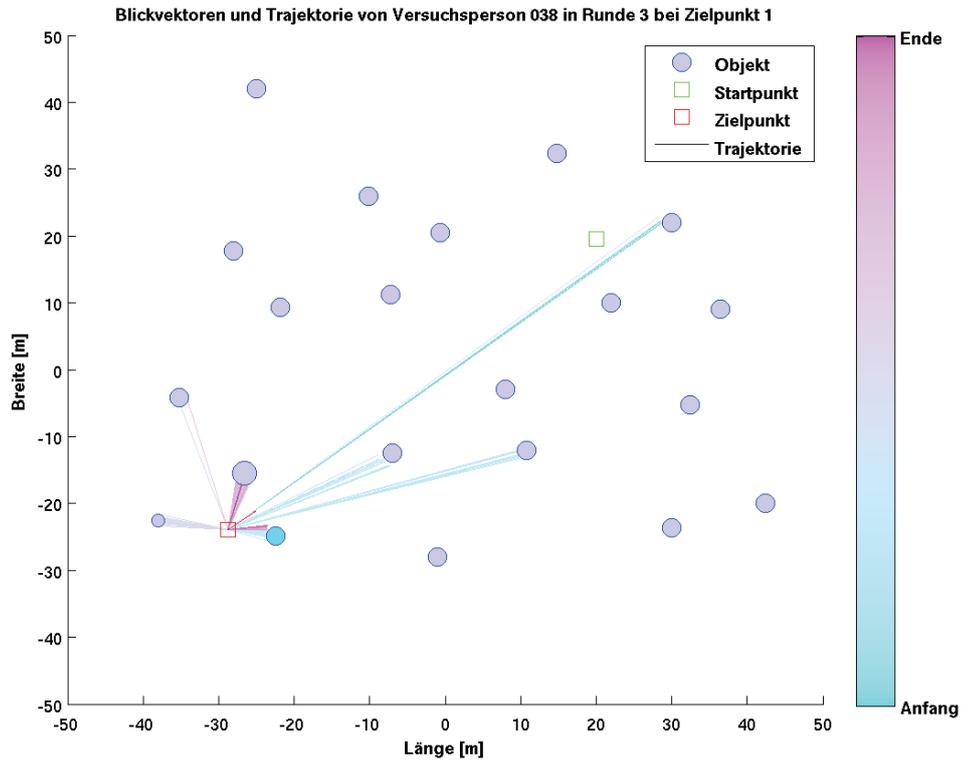


## Blickvektoren und Trajektorien

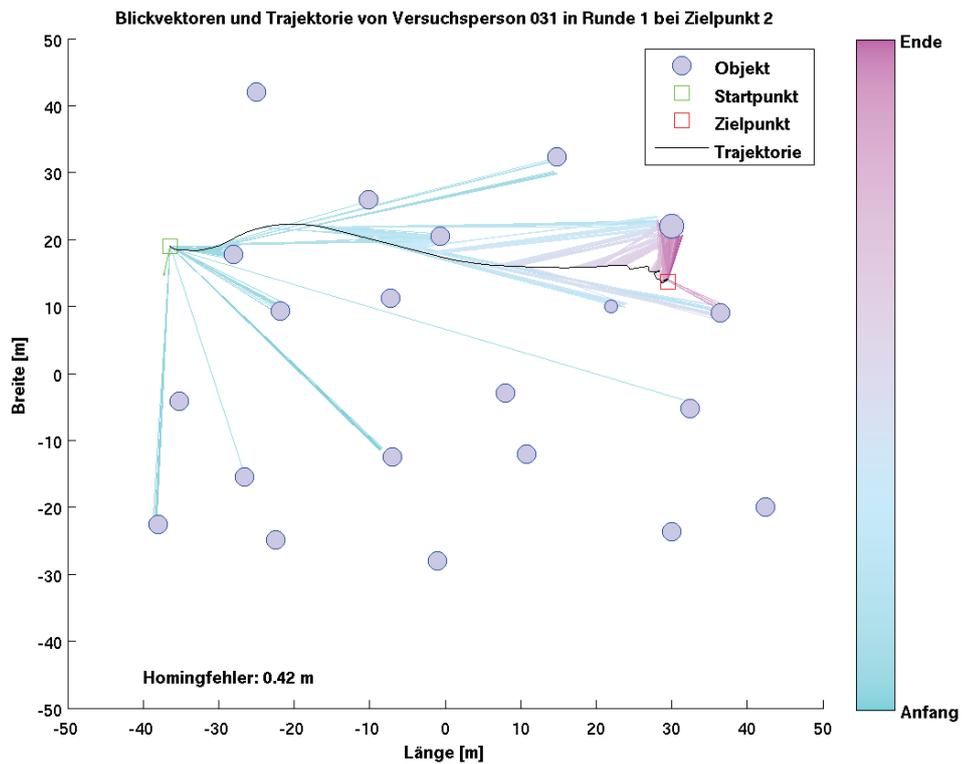
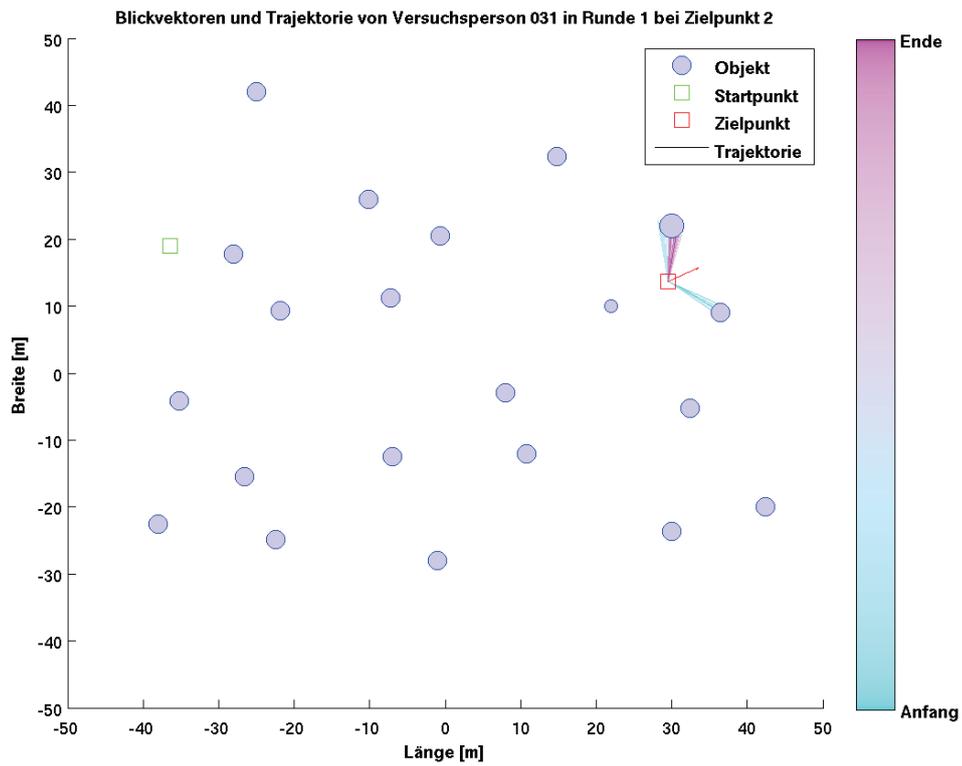
Es folgt eine Auswahl an typischen Blickvektoren und Trajektorien zu jedem Zielpunkt, jeweils einmal vor und einmal nach dem Ausblenden eines Objekts. Die obere Abbildung jeder Seite stellt die Orientierungsphase, die untere die Homingphase dar.

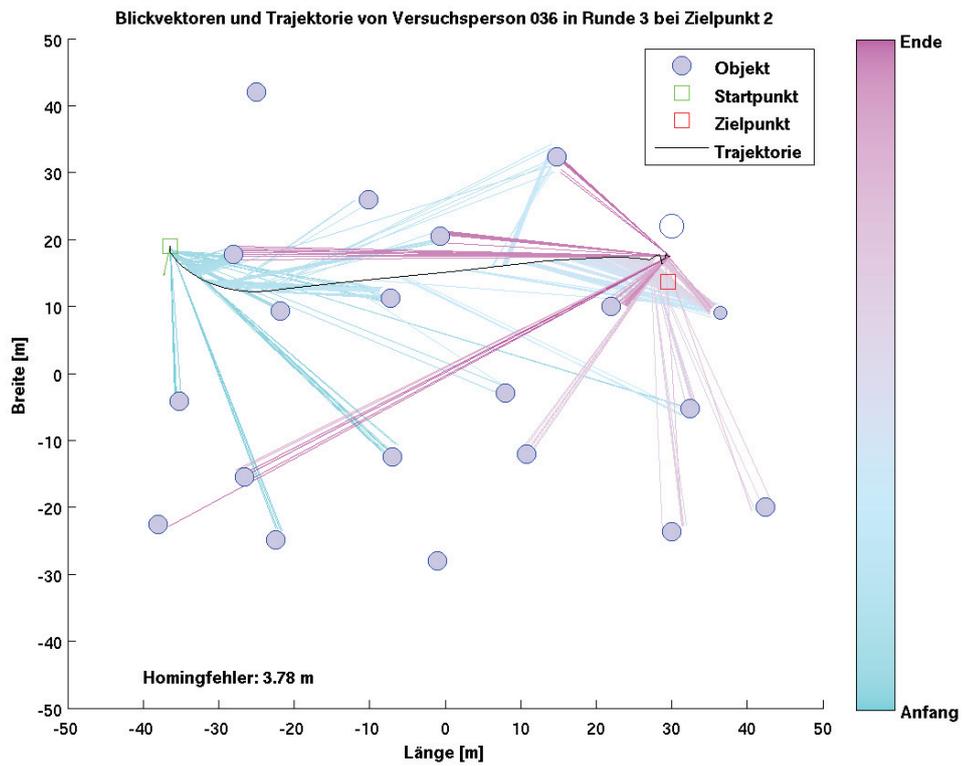
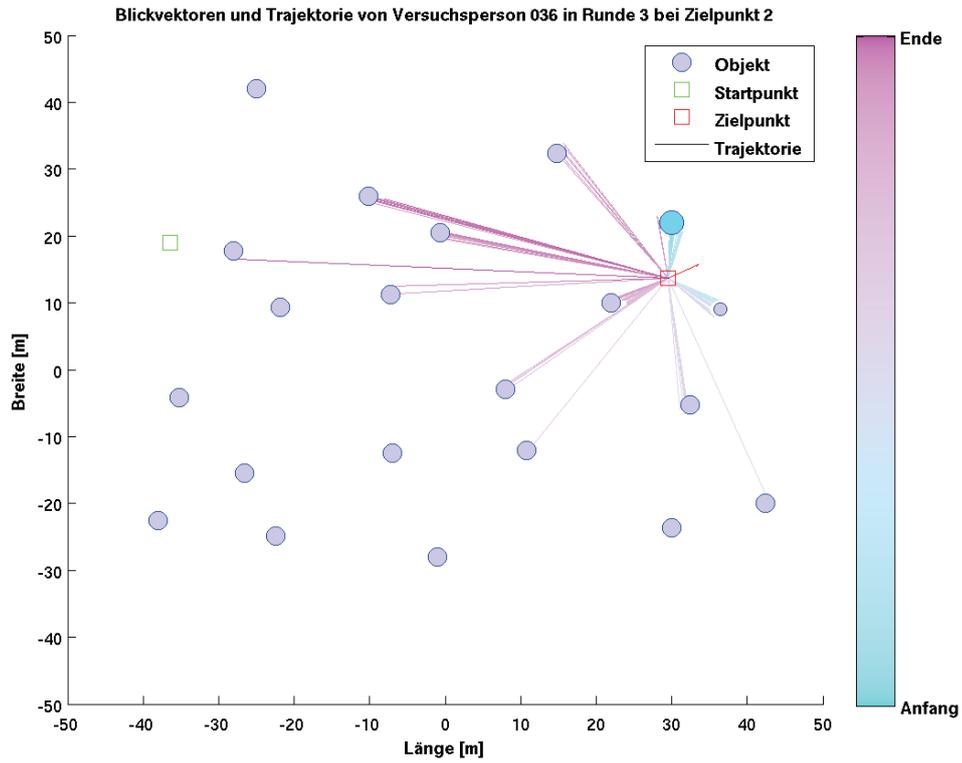
Zielpunkt 1:



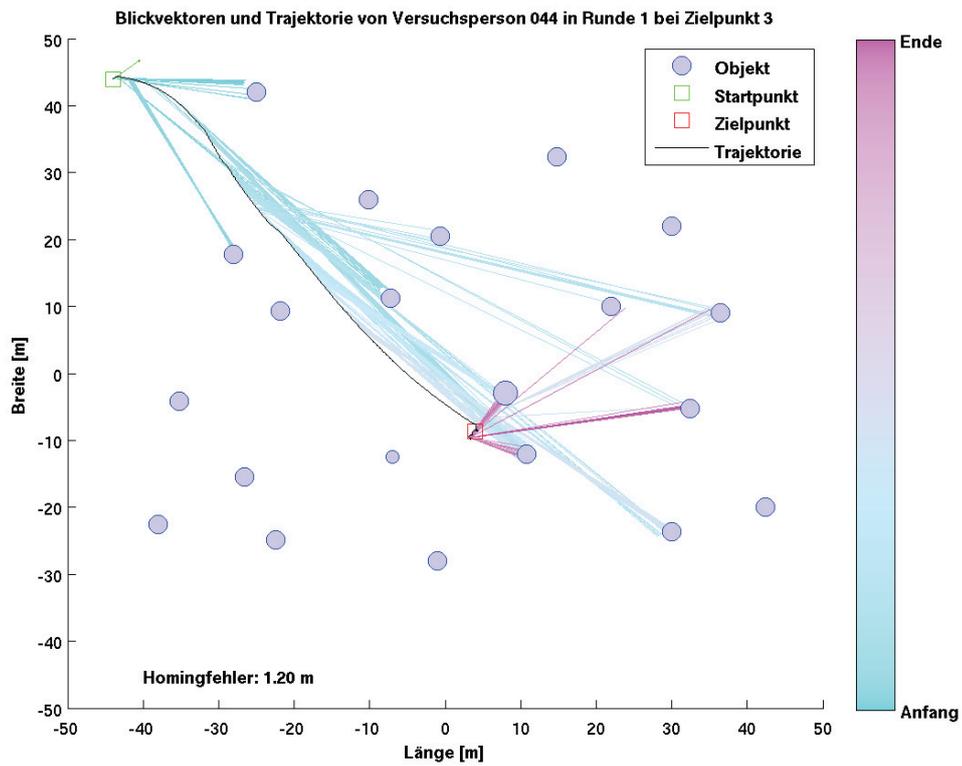
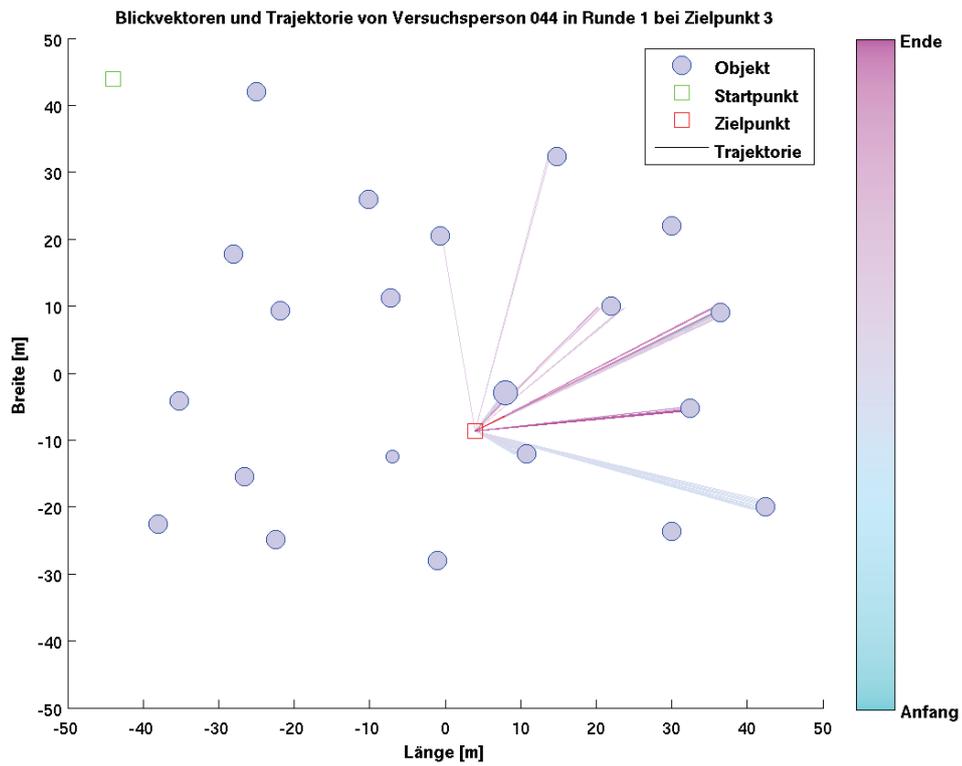


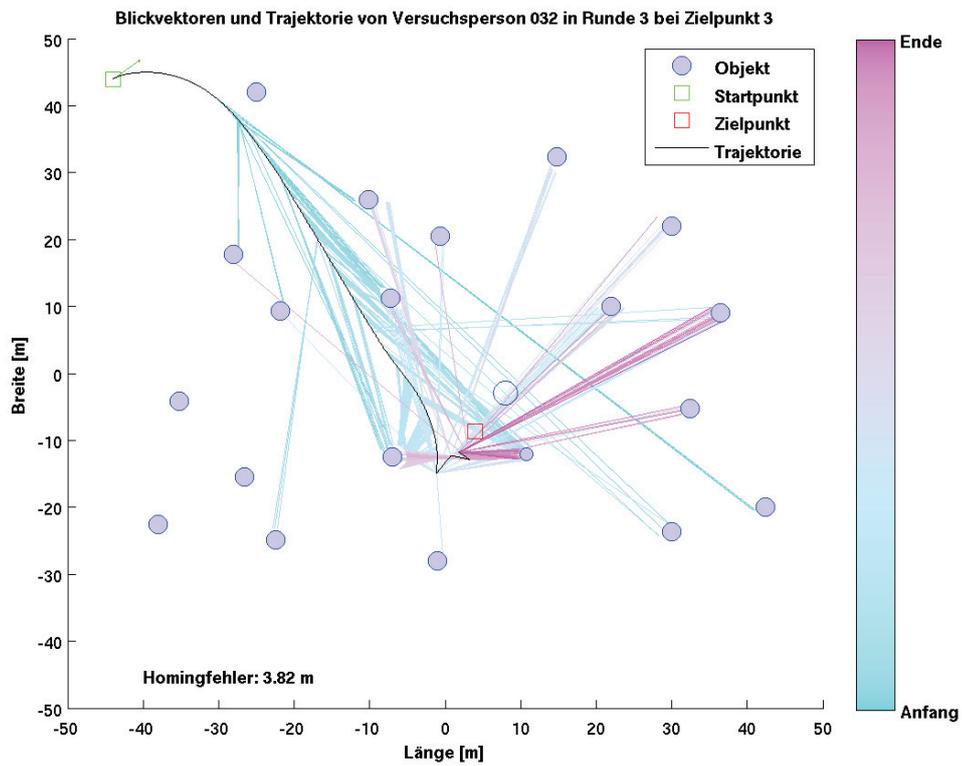
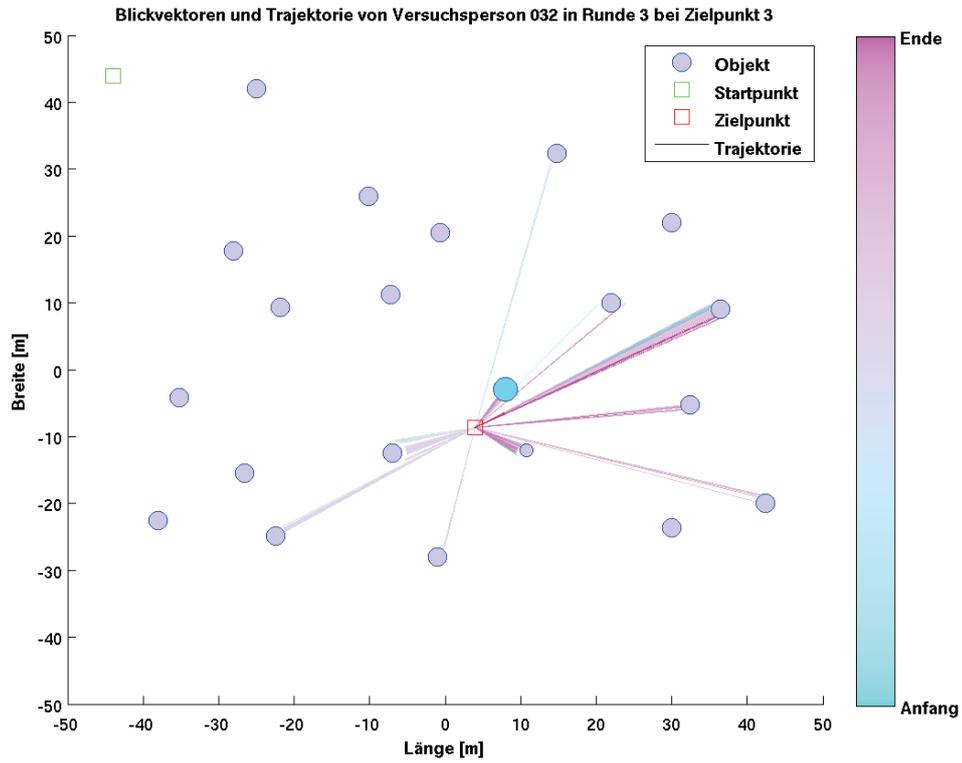
Zielpunkt 2:



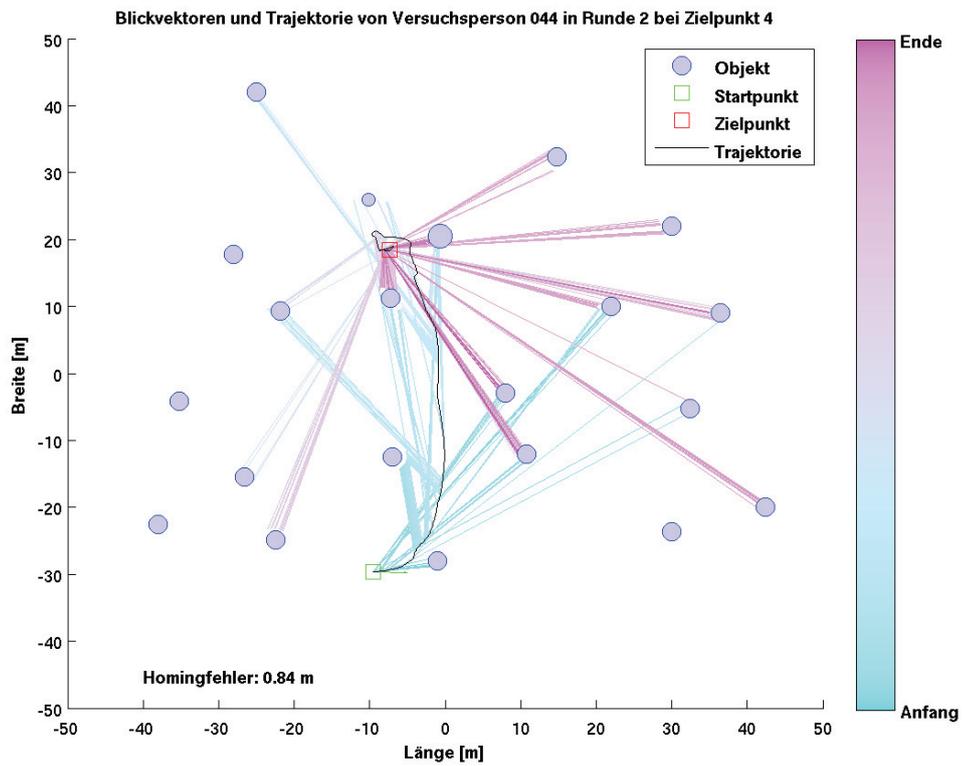
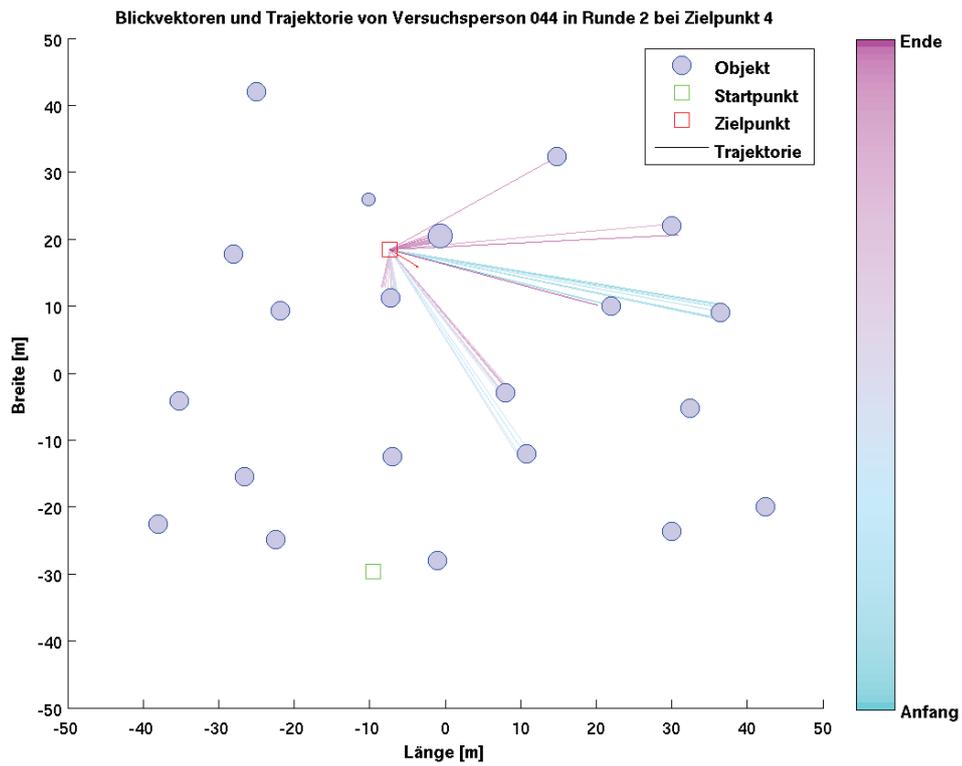


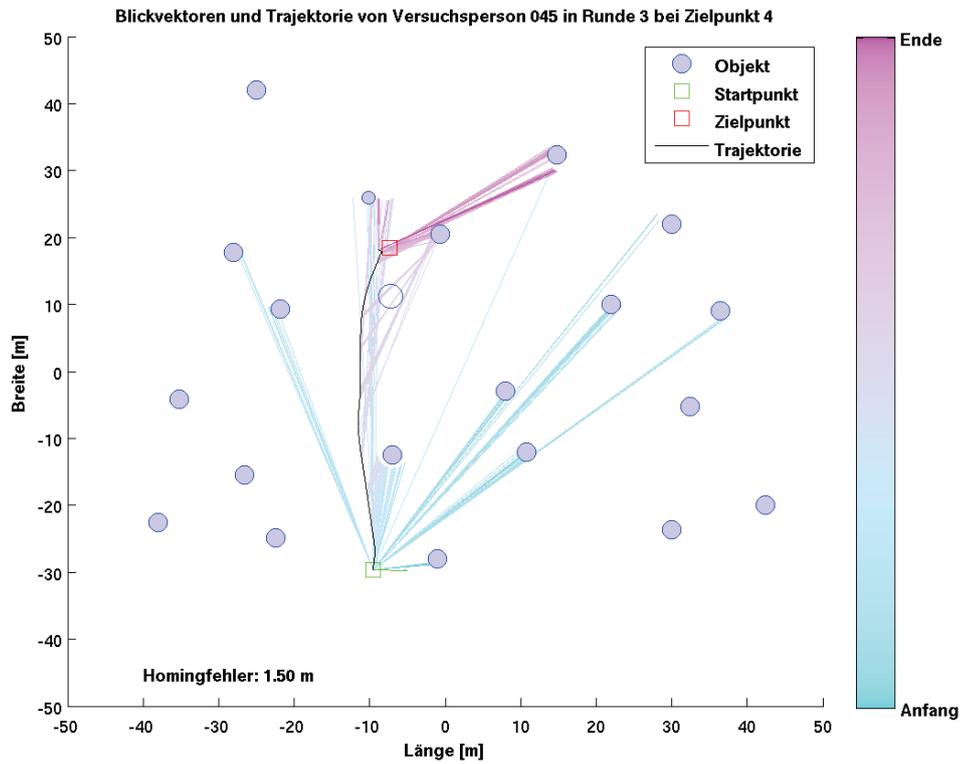
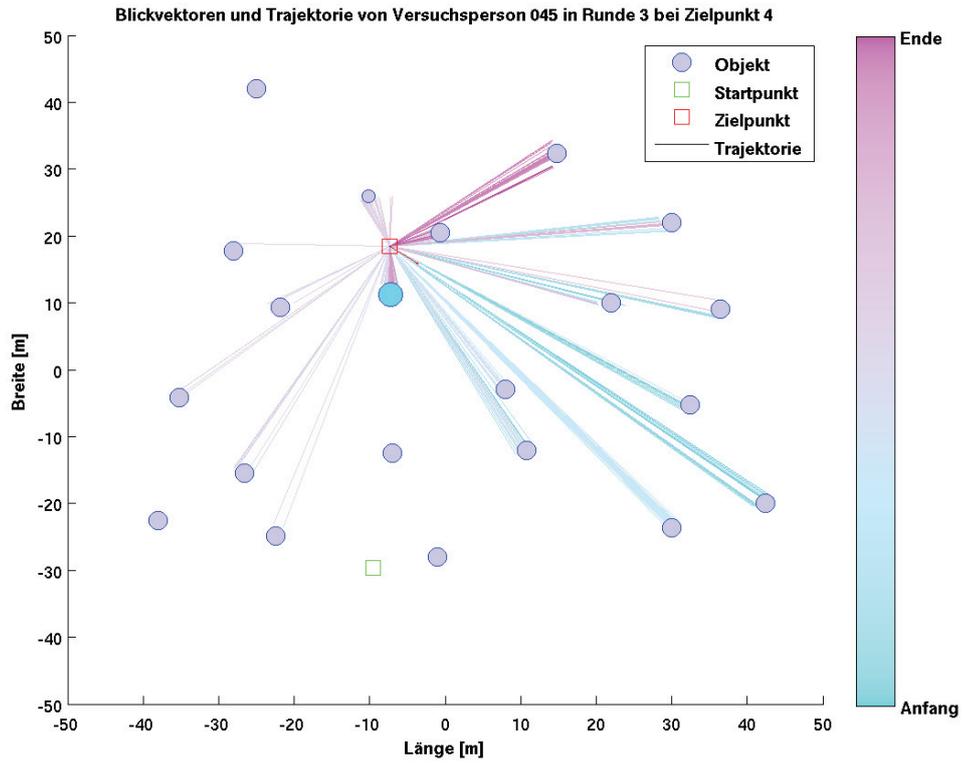
Zielpunkt 3:



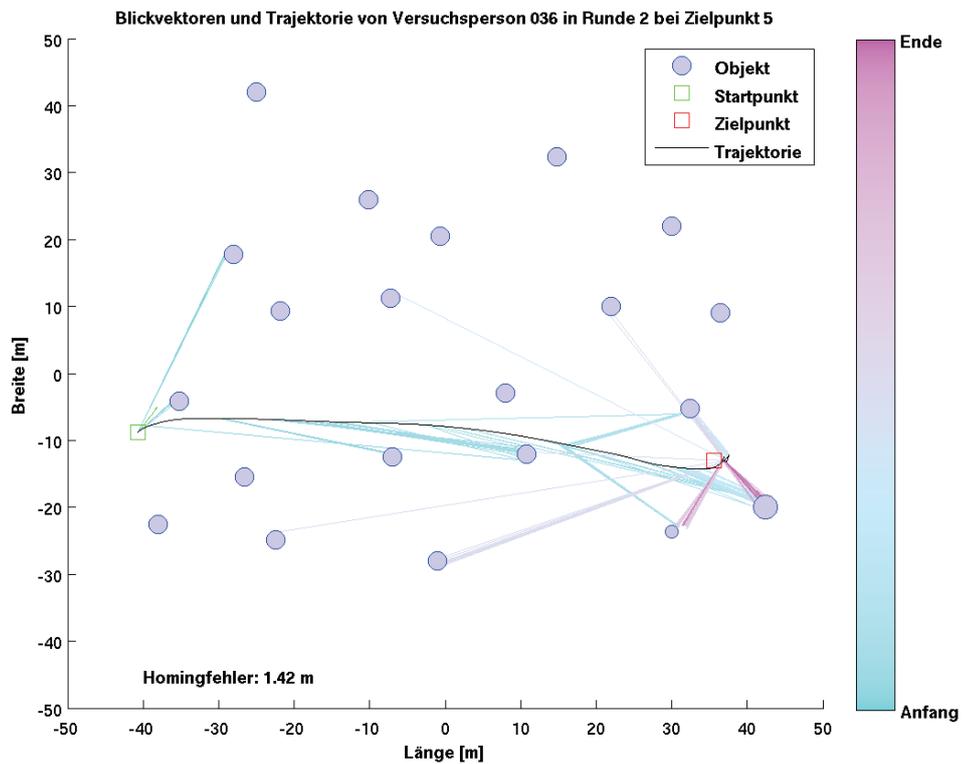
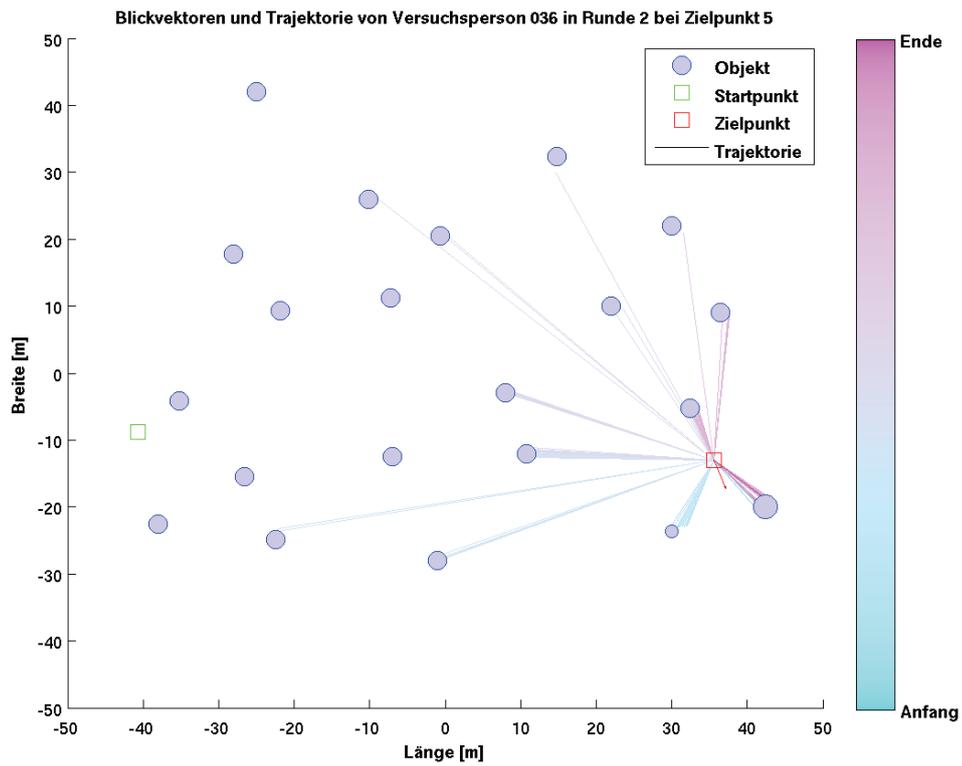


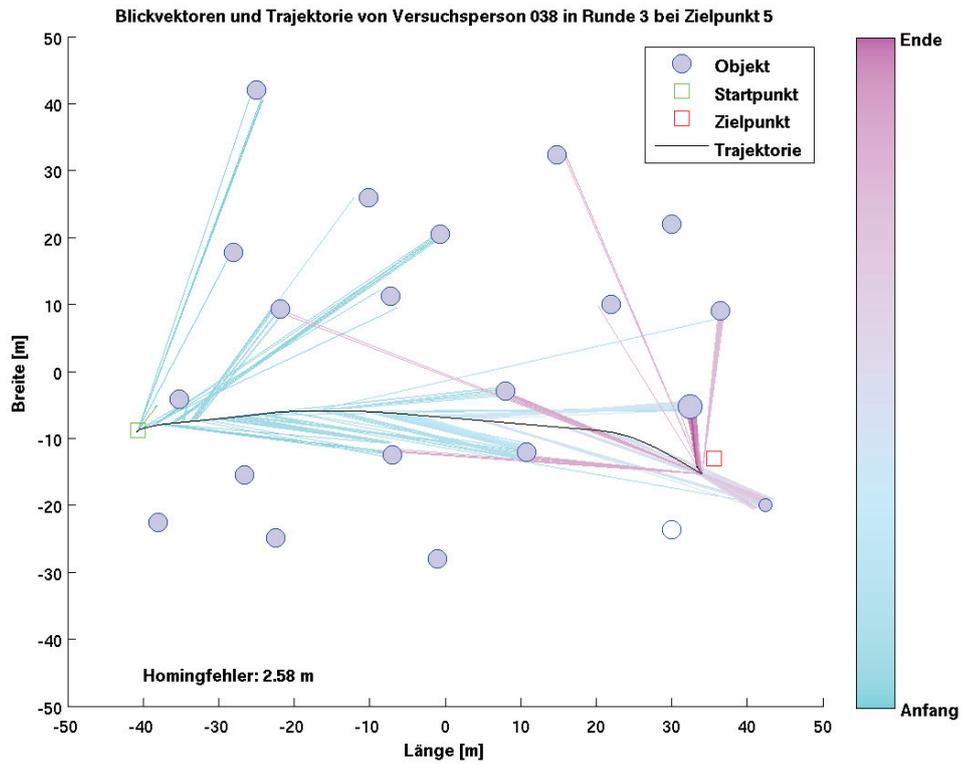
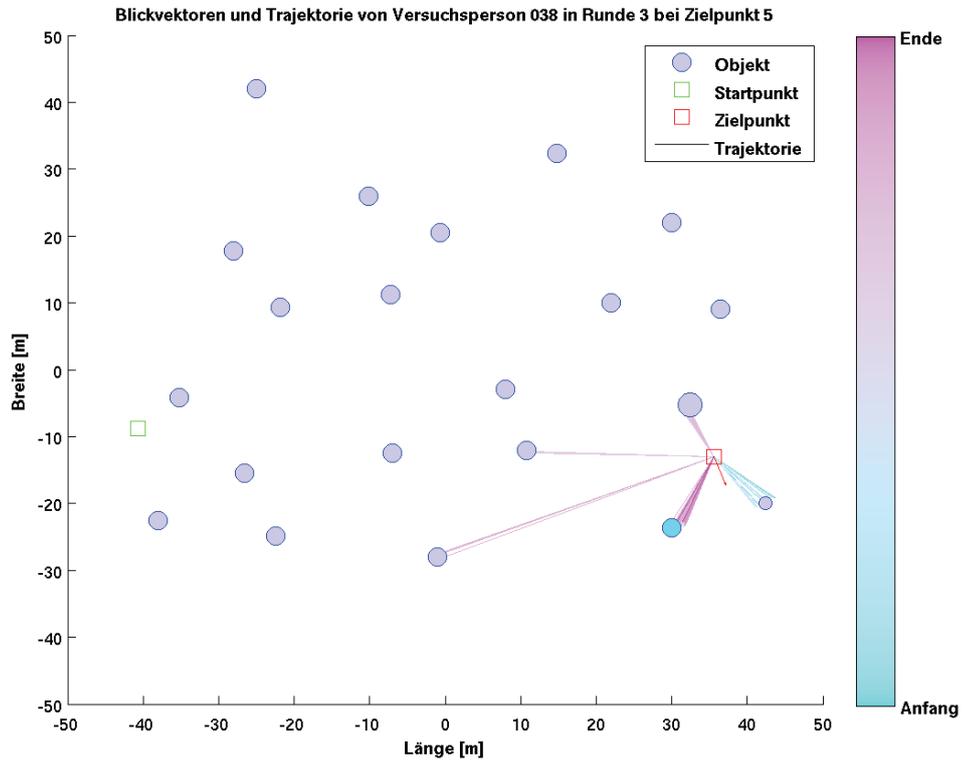
Zielpunkt 4:



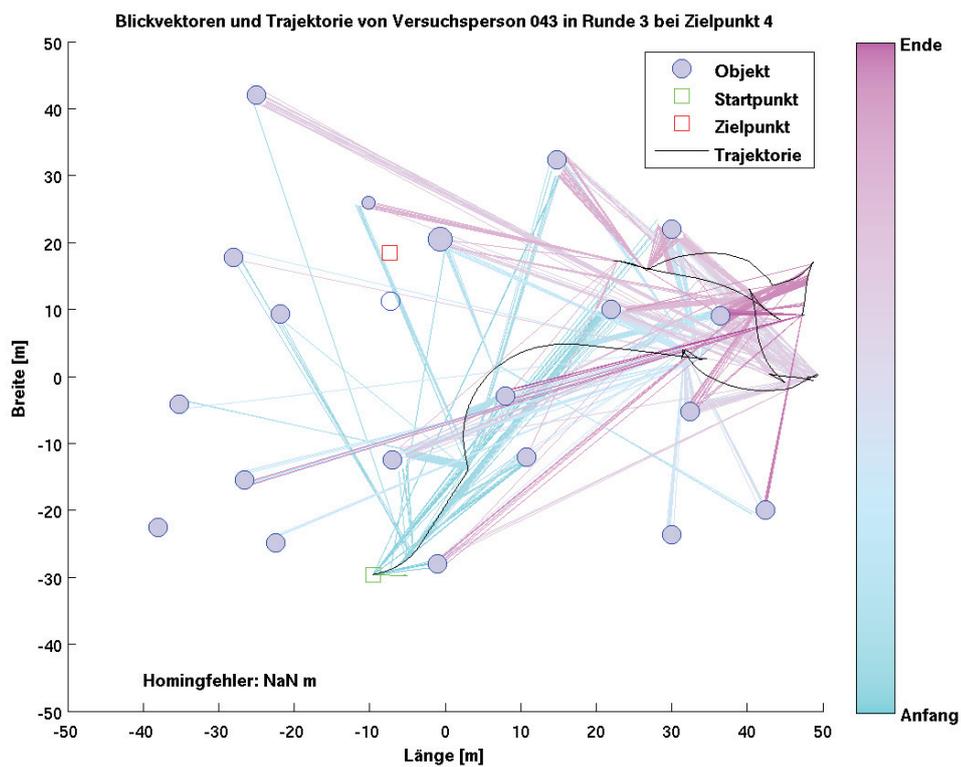
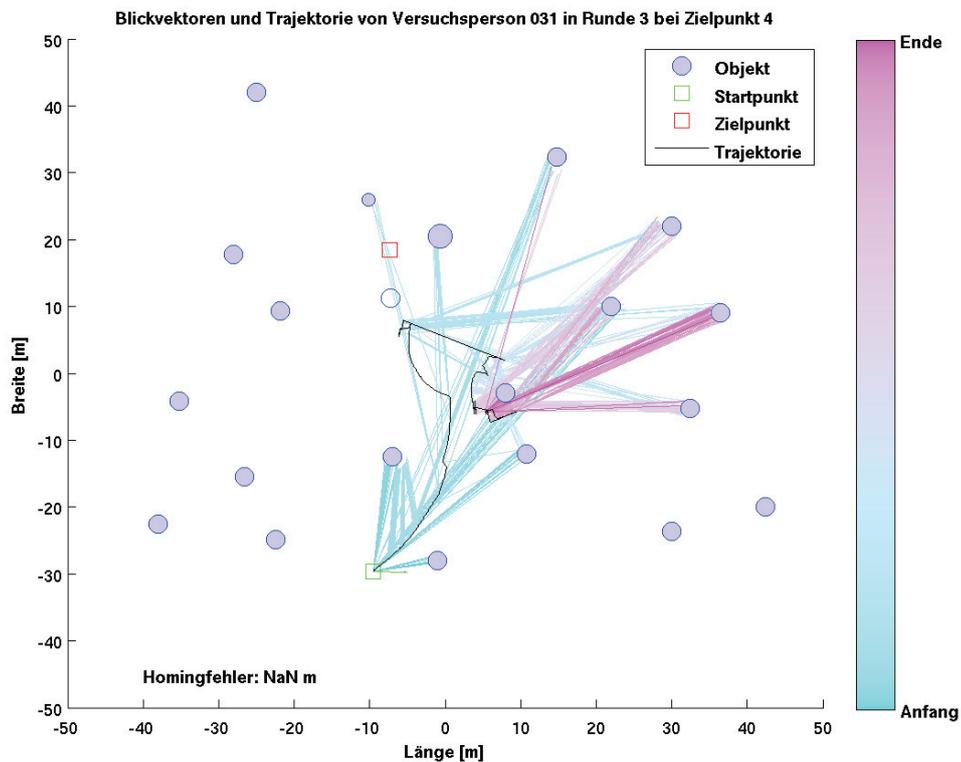


Zielpunkt 5:

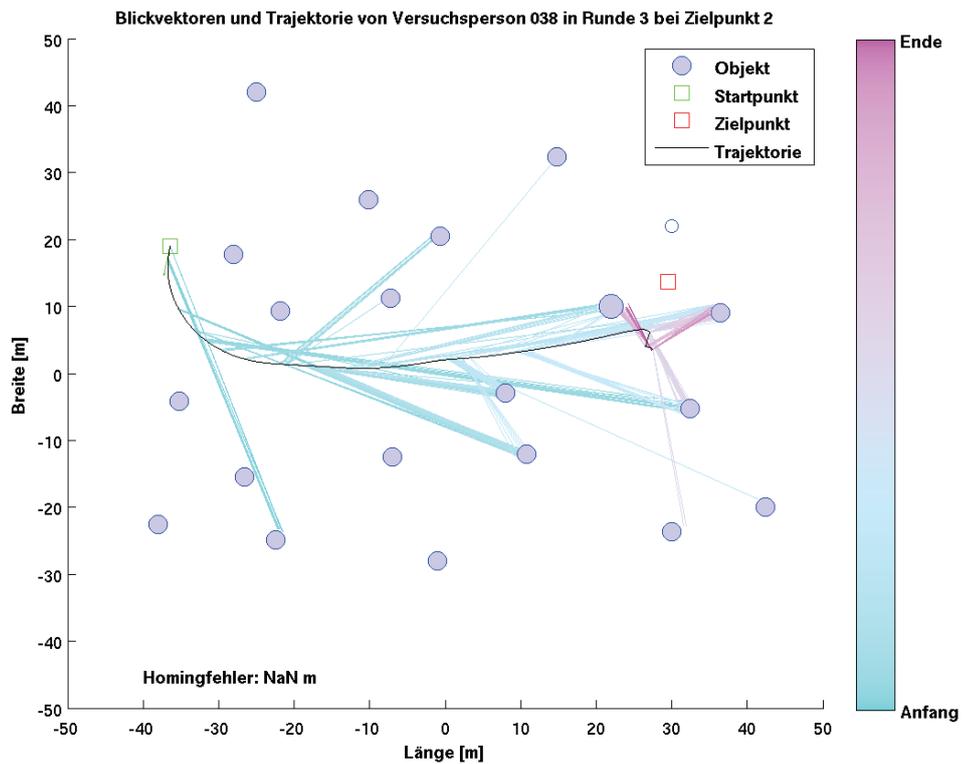
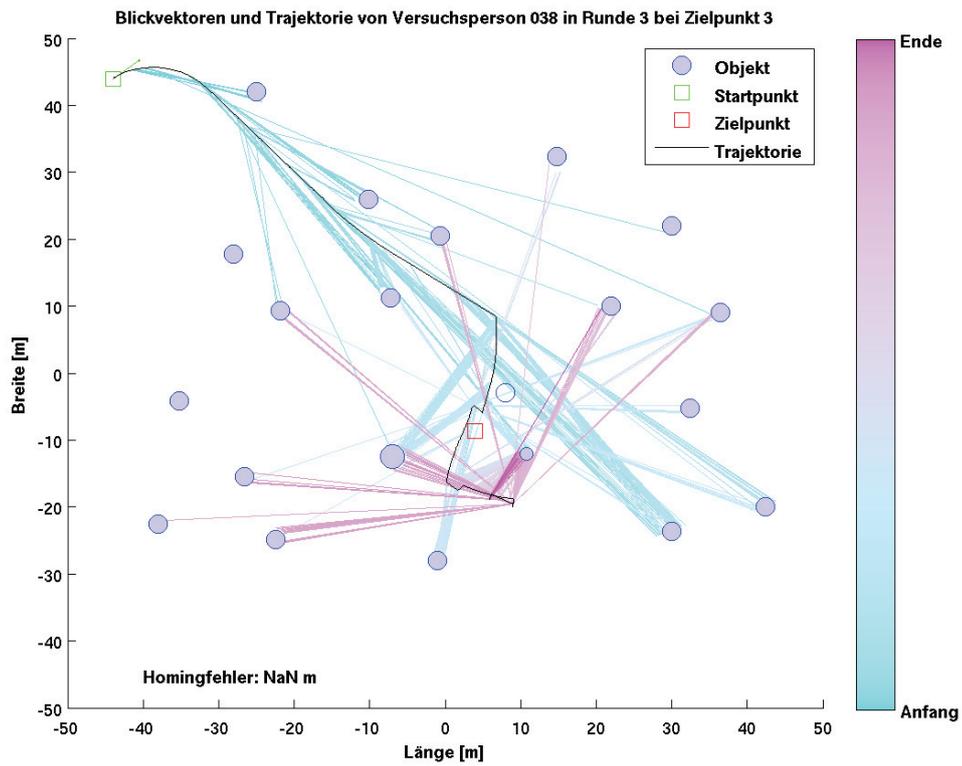




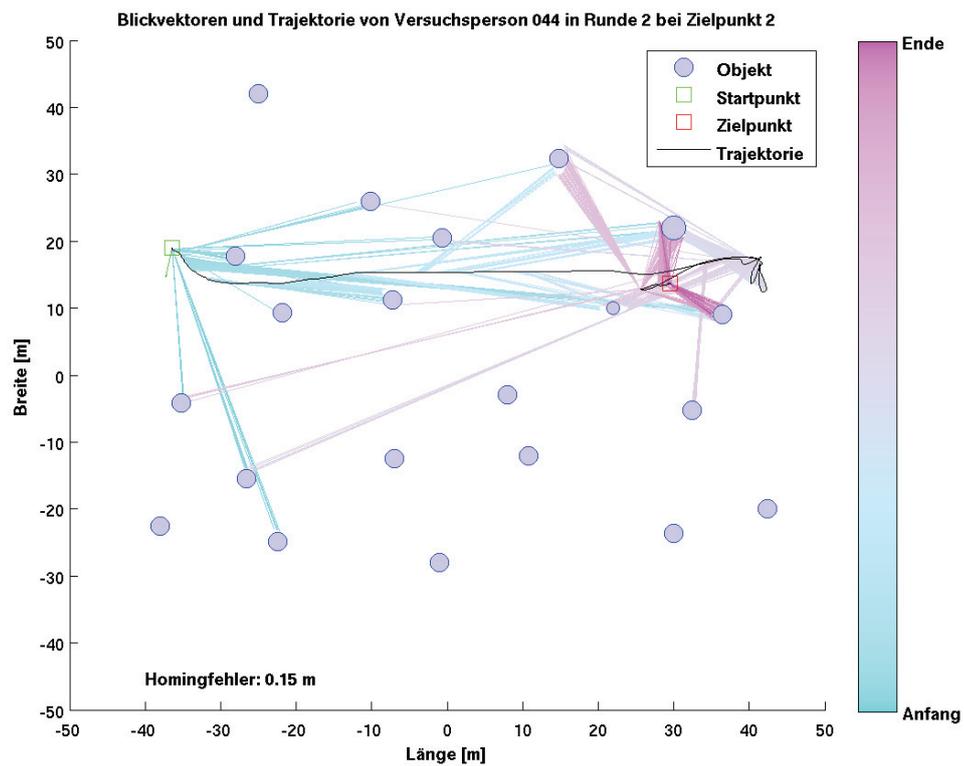
Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die Blickvektoren und Trajektorien von Versuchspersonen, die während der Homingphase die Orientierung verloren. Im Anschluss folgen weitere Abbildungen, die untypische Läufe der Probanden zeigen.



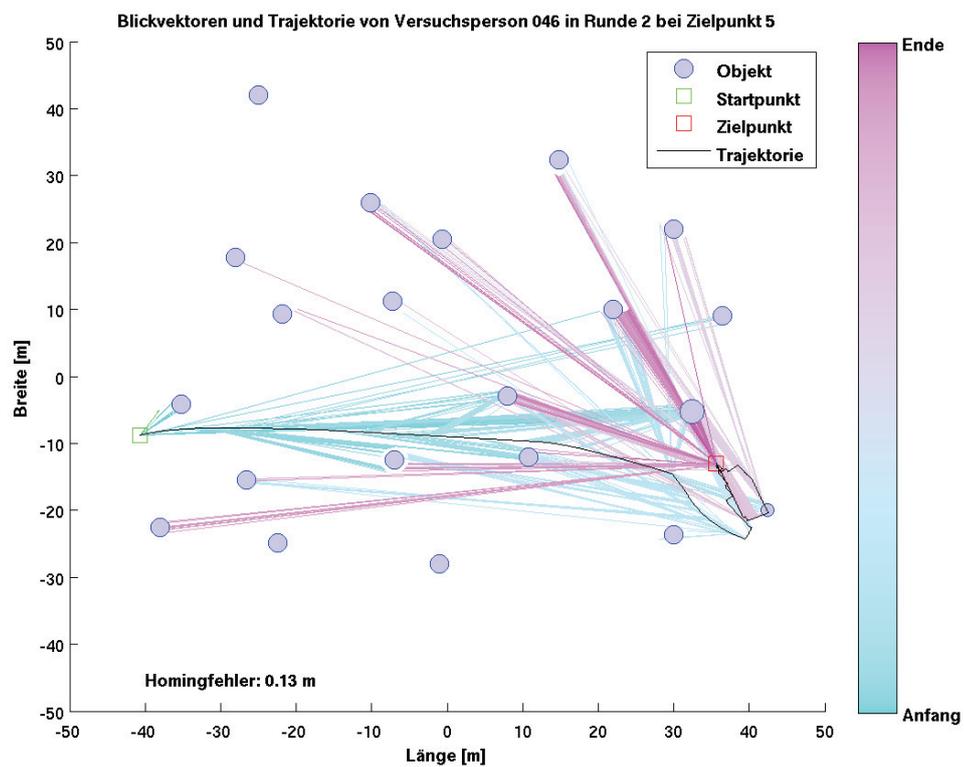
## Spiegelfehler:



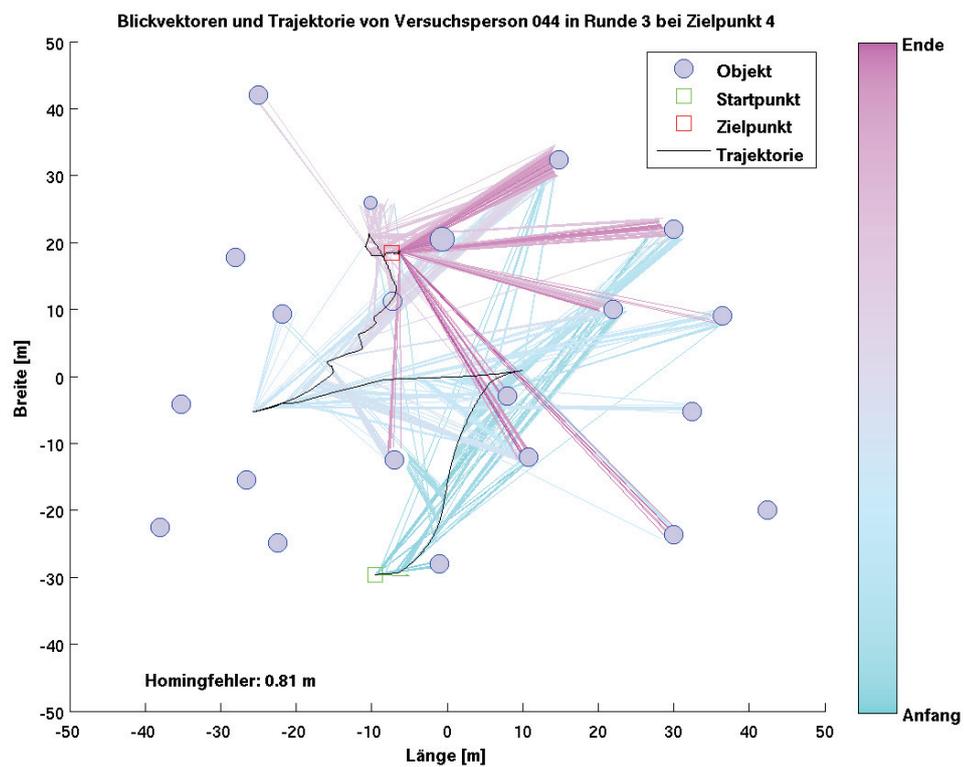
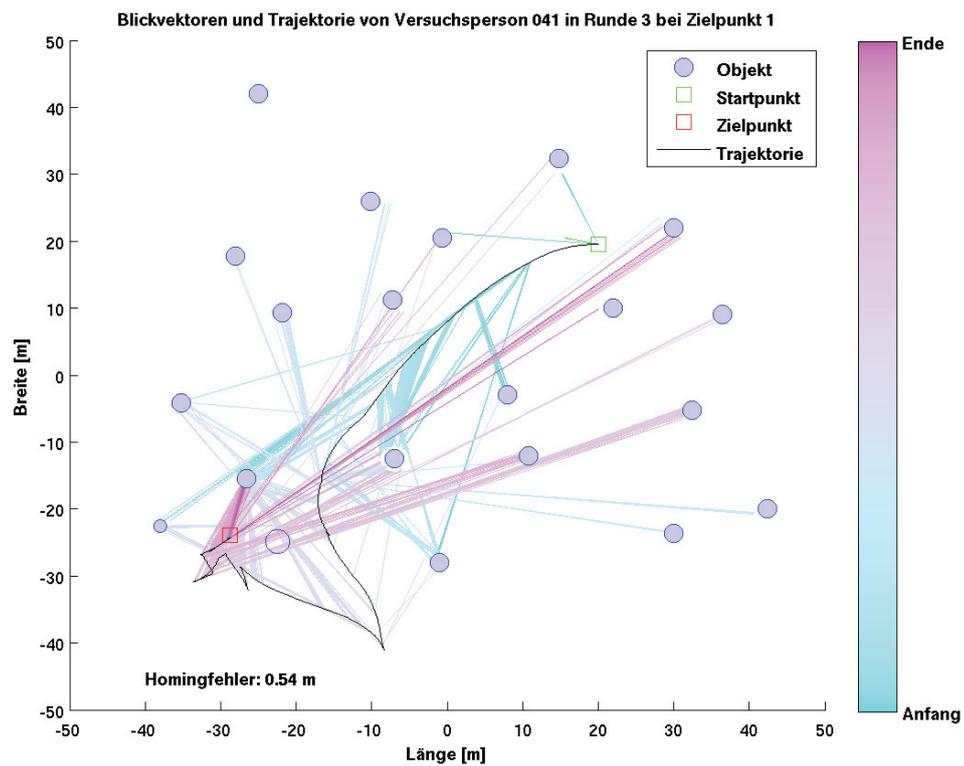
beinahe Spiegelfehler:



lange Laufstrecke:



lange Laufstrecke, Versuchsperson „suchte“ nach verschwundenem Objekt:



## **H Literaturverzeichnis**

- Cartwright B. A., Collett T. S. (1983): Landmark learning in bees. Experiments and models. *Journal of Comparative Physiology - A* 151: 521-543.
- Gillner S., Weiß A., Mallot H. A. (2007): Visual Place Recognition and Homing in the Absence of Feature-Based Landmark Information.
- Guo K. (2007): Initial fixation placement in face images is driven by top-down guidance. *Experimental Brain Research* 181(4): 673-677.
- Hollands M. A., Patla A. E., Vickers J. N. (2002): "Look where you're going!": gaze behaviour associated with maintaining and changing the direction of locomotion. *Experimental Brain Research* 143: 221-230.
- Hughes A. (1977): *Handbook of Sensory Physiology*, Bd. VII/5, Kap. 11, S. 619. Hg. Crescitelli F., Berlin: Springer-Verlag.
- Itti L., Koch C. (2000): A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research* 40(10-12): 1489-1506.
- Kearns M. J., Warren W. H., Duchon A. P., Tarr M. J. (2002): Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception* 31(3): 349-374.
- Koene A. R., Zhaoping L. (2007): Feature-specific interactions in salience from combined feature contrasts: evidence for a bottom-up saliency map in V1. *Journal of Vision* 7(7): Art. 6.
- Kozhevnikov M., Motes M. A., Rasch B., Blajenkova O. (2006): Perspective-Taking vs. Mental Rotation Transformations and How They Predict Spatial Navigation Performance. *Applied Cognitive Psychology* 20: 397-417.
- Land M. F., Hayhoe M. (2001): In what ways do eye movements contribute to everyday activities? *Vision Research* 41(25-26): 3559-3565.
- Le Meur O., Le Callet P., Barba D. (2007): Predicting visual fixations on video based on low-level visual features. *Vision Research* 47(19): 2483-2498.
- Mallot H. A. (2000): *Sehen und die Verarbeitung visueller Information*, 2. Aufl., Kap. 11, Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- Manor B. R., Gordon E. (2003): Defining the temporal threshold for ocular fixation in free-viewing visuocognitive tasks. *Journal of Neuroscience Methods* 128(1-2): 85-93.
- Mayer N. (2005): Über die Berechnung eines korrekten Blickvektors aus Messdaten. Studienarbeit am LS Kognitive Neurowissenschaften, Universität Tübingen.

- Merkel F. W. (1980): Orientierung im Tierreich. Stuttgart/New York: Gustav Fischer Verlag.
- Rothkopf C. A., Ballard D. H., Hayhoe M. M. (2007): Task and context determine where you look. *Journal of Vision* 7(14): Art. 16.
- Rothländer C. (2006): Automatische Bestimmung von fixierten Objekten bei verzerrter Projektion auf eine zylindrische Leinwand. Studienarbeit am LS Kognitive Neurowissenschaften, Universität Tübingen.
- Thier P., Ilg U. J. (2005): The neural basis of smooth-pursuit eye movements. *Current Opinion in Neurobiology* 15(6): 645-652.
- Wörmann M. (2000): Scannen und Fokussieren - Auswirkungen verbaler Kommunikation auf das Blickverhalten beim Autofahren. Diplomarbeit an der philosophischen Fakultät III, Universität Würzburg.
- Yarbus A. L. (1967): *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum Press.

## **Danksagung**

Bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Hanspeter Mallot und Dr. Sabine Gillner für die Bereitstellung des Diplomarbeitsthemas und des Arbeitsplatzes sowie die Korrektur.

Mein besonderer Dank geht an Dagmar Schoch für die umfassende Betreuung meiner Diplomarbeit, stetige Hilfsbereitschaft und Freundlichkeit, auch wenn wir mal geteilter Ansicht waren.

Ein Dank geht auch an Prof. Dr. Uwe Ilg für die Übernahme der Arbeit des Zweitkorrektors.

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

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mir diese Ausbildung ermöglicht hat und während der ganzen Zeit des Studiums immer zur Seite stand. Auch bei meiner Freundin möchte ich mich für ihre Hilfe und Geduld bedanken, die sie mir immerzu entgegenbrachte.