

Eberhard Karls Universität Tübingen

Diplomarbeit

Augenbewegungen und Aufnahme  
von Landmarkeninformationen  
in einer Wegfindeaufgabe

vorgelegt von

Christine E. Herold

Juli 2007

Betreuer:

Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot  
Dr. Sabine Gillner  
Dipl. Biol. Dagmar Schoch

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Straßer



Zoologisches Institut  
Lehrstuhl Kognitive Neurowissenschaft



Wilhelm Schickard Institut für Informatik  
Graphisch-Interaktive-Systeme



## **Erklärung**

Ich, CHRISTINE ELLEN HEROLD (Studentin der Bioinformatik an der Universität Tübingen, Matrikelnummer 2369464) erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Tübingen, den 25.07.2007



## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei dem Lehrstuhl für kognitive Neurowissenschaften bedanken, mit dem ich sehr gerne zusammengearbeitet habe. Insbesondere möchte ich Professor Mallot erwähnen, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an seinem Lehrstuhl die Diplomarbeit zu schreiben und mich durch zahlreiche kritische und konstruktive Diskussionen unterstützt hat. Professor Straßer danke ich dafür, dass er die Zweitkorrektur übernommen hat.

Meinen Betreuerinnen Sabine Gillner und Dagmar Schoch danke ich für die gute Betreuung, die vielen Diskussionen und das unermüdliche Korrigieren meiner Ausarbeitungen.

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

Für die schöne Zeit in Tübingen danke ich meinen Tübinger Freunden, die mit mir zusammen das ganze Studium gemeistert haben und den Fechttern, die mich nie im Stich gelassen haben, wenn ich noch kurzfristig einen Probanden brauchte. Nicht zu vergessen sind auch meine „preußischen“ Freunde, besonders die 5 Chaoten.

Besonderer Dank gilt auch meinen fleißigen Korrekturhelfern und vor allem meiner Familie, die mich immer unterstützt hat. Ganz besonders möchte ich meine Eltern erwähnen, die mir das Studium ermöglicht haben und immer an mich geglaubt und mich ermutigt haben. Danke!



## **Zusammenfassung**

Landmarken spielen bei der visuellen Navigation eine entscheidende Rolle, um unterschiedliches Verhalten zu erforschen. Steck & Mallot (2000) fanden bei einem Experiment in einer virtuellen Umgebung heraus, dass Probanden sowohl lokale als auch globale Landmarkeninformationen bei einer Wegfindeaufgabe verwendeten, in welcher es wichtig war, bestimmte Bewegungsvektoren den beiden Landmarkentypen zuzuordnen. Das Paradigma diente zur Feststellung welchen Landmarkentyp der Proband für eine bestimmte Bewegungsentscheidung nutzte. In dieser Diplomarbeit wurde das Experiment von S. Steck reproduziert und zusätzlich untersucht, ob ein Zusammenhang mit den Augenbewegungen besteht. Dieser Zusammenhang wurde schon in einer Reihe von Verhaltensmustern gezeigt, z.B. bei der Tee- und Sandwichzubereitung (Land & Hayhoe, 2001). Die Messung von Augenbewegungen könnte auch ein wertvolles Hilfsmittel sein, um die Verwendung von Landmarken zu analysieren. Eine Hypothese ist, dass Landmarken, die für eine Bewegungsentscheidung verwendet werden, häufiger und länger fixiert werden, insbesondere kurz vor der Entscheidung. Eine weitere Hypothese ist, dass die letzte Fixation vor der Bewegungsentscheidung dafür ausschlaggebend ist, wie man sich entscheidet.

Unsere Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse von S. Steck, dass beide Arten von Landmarken in gleicher Zahl verwendet werden. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen Fixationshäufigkeit, -länge oder der letzten Fixation und der Bewegungsentscheidung konnte hingegen nicht festgestellt werden.



## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>11</b> |
| 1.1      | Überblick . . . . .  | 11        |
| 1.2      | Kybernetik . . . . .   | 11        |
| 1.2.1    | Handlungs-Wahrnehmungs-Kreislauf . . . . .                         | 11        |
| 1.2.2    | Kognition . . . . .  | 12        |
| 1.3      | Virtuelle Realität . . . . .                                       | 13        |
| 1.3.1    | Definition und Anwendung . . . . .                                 | 13        |
| 1.3.2    | Geschichte der Computergrafik . . . . .                            | 17        |
| 1.4      | Navigationsforschung . . . . .                                     | 19        |
| 1.4.1    | Navigation . . . . .   | 19        |
| 1.4.2    | Definition von Landmarken . . . . .                                | 21        |
| 1.4.3    | Topologische Navigation . . . . .                                  | 22        |
| 1.4.4    | Neurophysiologie des Ortsgedächtnisses . . . . .                   | 23        |
| 1.5      | Augenbewegungen . . . . .  | 24        |
| 1.5.1    | Arten von Augenbewegungen . . . . .                                | 24        |
| 1.5.2    | Messen von Augenbewegungen . . . . .                               | 27        |
| 1.6      | Fragestellung . . . . .  | 27        |
| <b>2</b> | <b>Material und Methoden</b>                                       | <b>29</b> |
| 2.1      | Material . . . . .   | 29        |
| 2.1.1    | Versuchsaufbau . . . . .   | 29        |
| 2.1.2    | Eye- und Headtracker . . . . .                                     | 31        |
| 2.1.3    | Probanden . . . . .  | 34        |
| 2.2      | Methoden . . . . .   | 34        |
| 2.2.1    | Virtuelle Umgebung: Hexatown . . . . .                             | 34        |
| 2.2.2    | Versuchsablauf . . . . .   | 36        |
| 2.2.3    | Programmbeschreibung . . . . .                                     | 41        |
| 2.3      | Datenanalyse . . . . .   | 43        |
| 2.3.1    | Automatische Auswertung . . . . .                                  | 45        |
| 2.3.2    | Manuelle Auswertung . . . . .                                      | 46        |
| 2.3.3    | Analyse der Daten . . . . .  | 47        |
| <b>3</b> | <b>Ergebnisse</b>  | <b>51</b> |
| 3.1      | Bewegungsentscheidungen . . . . .                                  | 54        |
| 3.2      | Verhalten in den Trainings- und Orientierungsphasen . . . . .      | 56        |
| 3.3      | Augenbewegungen . . . . .  | 57        |
| 3.4      | Zusammenhang zwischen Augenbewegungen und Entscheidungen . . . . . | 60        |
| 3.5      | Fragebogen . . . . .   | 63        |
| 3.6      | PTA-Test . . . . .   | 64        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4 Diskussion</b>   | <b>65</b>  |
| 4.1 Vergleich mit den Ergebnissen von S. Steck . . . . .                  | 65         |
| 4.2 Verhalten in den Trainings- und Orientierungsphasen . . . . .         | 66         |
| 4.3 Augenbewegungen . . . . .   | 67         |
| 4.4 Zusammenhang von Fixation und Entscheidung . . . . .                  | 68         |
| 4.5 PTA-Test . . . . .  | 69         |
| 4.6 Hypothese und weitere Beobachtung . . . . .                           | 69         |
| <b>5 Fazit</b>  | <b>71</b>  |
| <b>A Versuchsanweisung</b>  | <b>73</b>  |
| <b>B Fragebogen zu dem Experiment</b>                                     | <b>75</b>  |
| <b>C Versuchsumgebung</b>   | <b>78</b>  |
| C.1 Kreuzungen in Hexatown . . . . .                                      | 78         |
| C.2 Landmarken in Hexatown . . . . .                                      | 79         |
| C.3 Anfahrtswege bei den Bewegungsentscheidungen . . . . .                | 82         |
| <b>D weitere Ergebnisse</b>   | <b>85</b>  |
| D.1 Trainingsphasen . . . . .   | 85         |
| D.2 Orientierungsphase . . . . .  | 86         |
| D.3 Testphase . . . . .   | 88         |
| D.4 Korrelationen von Bewegungsentscheidung und Augenbewegungen . . . . . | 89         |
| D.5 Korrelation Leinwandseite und Richtungsentscheidung . . . . .         | 90         |
| <b>E Zeitliche Abläufe der Fixationen</b>                                 | <b>91</b>  |
| <b>Literatur</b>  | <b>119</b> |

# 1 Einleitung

## 1.1 Überblick

Stellen Sie sich vor, Sie haben in einer fremden Stadt Ihr Auto in einem Parkhaus abgestellt. Nachdem Sie die Stadt besichtigt haben, wollen Sie wieder zurück zu Ihrem Auto. Um den Weg zurückzufinden, werden Sie sich an lokalen Objekten, z.B. einer Bäckerei oder einem Blumenladen, oder globalen Objekten, z.B. einem Fernsehturm, orientieren, die Ihnen beim Hinweg aufgefallen sind. Jeder Mensch merkt sich dabei andere Objekte und verfolgt verschiedene Strategien, um an den Ausgangspunkt zurückzugelangen. Aus diesem alltäglichen Beispiel kann man einige interessante Fragen ableiten: Welche Objekte werden angeschaut? Kann man anhand der Augenbewegungen, insbesondere der Fixationen, solche Landmarken identifizieren? Gibt es einen Zusammenhang zwischen letzter oder längster Fixation auf eine Landmarke und der Entscheidung, ob man links oder rechts weitergeht? Werden eher lokale oder globale Landmarken benutzt?

Bevor auf diese oder ähnliche Fragen näher eingegangen wird, gebe ich zunächst eine Übersicht über die wichtigsten Begriffe und die Literatur, die in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind.

## 1.2 Kybernetik

### 1.2.1 Handlungs-Wahrnehmungs-Kreislauf

Die Kybernetik ist die Wissenschaft von Steuerungs- und Regelungsmechanismen in belebten und unbelebten Systemen. Die Wechselwirkung zwischen Mensch und Umwelt lässt sich am besten durch den aus der Kybernetik stammenden Regelkreis von Wahrnehmung und Handlung (Mallot, 2000), der auf Uexküll & Krisat (1934) zurückgeht (Abb. 1), beschreiben. In diesem Kreislauf wird das Verhalten in drei Komponenten unterteilt: Wahrnehmung, Verhalten und Speichern von Informationen.

Die Sinne (Sehen, Hören, Riechen, Schmecken, Tasten, Lage und Gleichgewicht sowie Propriozeption) geben dem Menschen Informationen über seine Umwelt. Über die Effektoren (Bewegungsapparat, endokrine Drüsen) und dem damit verbundenen Verhalten tritt der Organismus mit seiner Umwelt in Verbindung. Die Effektoren sind mehrfach mit den Sensoren verbunden und bekommen dadurch Information über die interne Regulation (Abb. 1a), Sensomotorik und akquisitorisches Verhalten z.B. Augenbewegungen (Abb. 1b) und Veränderungen der Umwelt (Abb. 1c). Der Organismus kann durch sein Verhalten die Umwelt selbst verändern bzw. seine Wahrnehmung von ihr, indem er z.B. seinen Standort wechselt. Die Aufgabe der Wahrnehmung ist es daher, den gesamten Kreislauf optimal zu unterstützen, um dadurch situationsgerechtes Verhalten zu ermöglichen.

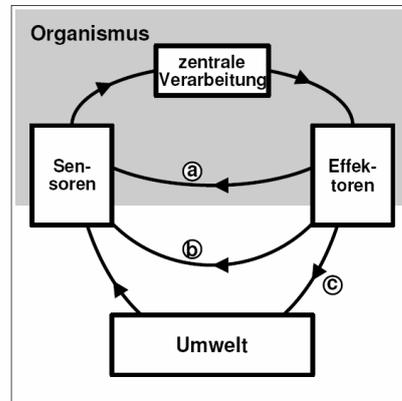


Abbildung 1: Der Handlungs-Wahrnehmungs-Kreislauf (Mallot, 2000) zeigt die Interaktionen zwischen dem Menschen und seiner Umwelt.

### 1.2.2 Kognition

Kognition beschreibt die Gesamtheit aller Prozesse, die mit dem Wahrnehmen und Erkennen zusammenhängen.

Um die Informationsverarbeitungsprozesse des Verhaltens besser verstehen zu können, unterscheidet Mallot (2000) zwischen verschiedenen Komplexitätsstufen:

- Niveau 0, Reizbarkeit: keine Trennung von Sensor und Effektor und somit keine Erregungsleitung
- Niveau 1, Reflexe, Taxien: Erregungsleitung vom Sensor zum Effektor
- Niveau 2, Integration: Zusammenfügen von verschiedenen sensorischen Informationen in Interneuronen, womit sich ein Arbeitsgedächtnis realisieren lässt, welches für orts-zeitliche Manöver nötig ist.
- Niveau 3, Lernen: Langzeitgedächtnis, für Geschicklichkeiten, Gewohnheiten, Routen etc. mit gleichzeitiger Verhaltensflexibilität durch Umlernen
- Niveau 4, Kognitives Verhalten: Zielabhängige Verhaltensflexibilität aufgrund von Aussagewissen
- Niveau 5, Theory of Mind: Information über den Wissensstand, Absichten und mentale Zustände anderer Individuen

Für diese Arbeit ist die vierte Komplexitätsstufe, also kognitives Verhalten, von Bedeutung. Von kognitivem Verhalten spricht man, wenn ein Organismus, in unserem Fall der Mensch, in der Lage ist, flexibel auf die Umweltsituationen zu reagieren (zielabhängige Verhaltensflexibilität).

Ein wichtiger Teil der kognitiven Leistungen ist Raumkognition. Die Raumkognition umfasst das Wahrnehmen und Erkennen des Raumes, das Vorstellen der Anordnung von Objekten im Raum, das Wissen über den Raum und die Planung von Handlungen, die im Raum ausgeführt werden sollen. Somit entscheiden nicht nur die Sinne und das Gedächtnis über das Verhalten, sondern auch die Ziele, sowie das Wissen darüber, wie die Ziele erreicht werden können. Diese Leistung wird als zielabhängige Flexibilität bezeichnet. Das bedeutet, dass der Beobachter mithilfe der Landmarkenkonfiguration, der Anordnungen verschiedener Bezugspunkte wie z.B. einem Leuchtturm oder einem bestimmten Haus, den Ort wiedererkennt und sich dann flexibel entscheiden kann, in welche Richtung er geht, um sein Ziel zu erreichen. Dieses Aussagewissen („deklaratives Gedächtnis“), das diese Leistung ermöglicht, nennt man kognitive Karte (Tolman, 1948; O’Keefe & Nadel, 1978; Mallot, 2000).

### 1.3 Virtuelle Realität

#### 1.3.1 Definition und Anwendung

Da das Navigationsexperiment, welches für diese Diplomarbeit verwendet wurde, in einer virtuellen Umgebung durchgeführt wurde, soll dieser Begriff im Folgenden näher erläutert werden. Als virtuelle Realität wird die Schnittstelle zwischen dem Menschen und einer computergenerierten Umgebung definiert. Die Person hat dabei das Gefühl, sich in einer computergenerierten Welt, wie z.B. einer virtuellen Stadt, zu befinden, in der sie sich in Echtzeit mehr oder weniger frei bewegen kann. Für Experimente in der virtuellen Realität werden hochentwickelte Ein- und Ausgabegeräte wie Projektionsleinwände, Datenbrillen (Head Mounted Displays, HMD, Abb. 2a), Joysticks, Datenhandschuhe (Abb. 2b), Positionstracker etc. verwendet.



(a) Datenbrille



(b) Datenhandschuh

Abbildung 2: Die Datenbrille oder auch Head Mounted Display (HMD) ist ein visuelles Ausgabegerät und hilft, in eine virtuelle Welt einzutauchen. Der Datenhandschuh hingegen ist ein Eingabegerät. Über ihn kann durch Bewegungen der Hand und Finger eine Orientierung im virtuellen Raum erfolgen. (Bilder aus: <http://www.metamotion.com>; <http://www.5dt.com>)

Anfangs wurde die virtuelle Realität durch Flugsimulatoren bekannt, heute

ist sie eine Standardmethode für Verhaltens- und Wahrnehmungsexperimente (Gillner & Mallot, 2001; Loomis et al., 2003; Hayhoe & Ballard, 2005). Die virtuelle Realität wird aber auch weiterhin zur Aus- und Weiterbildung und Visualisierung von komplexen Objekten verwendet. Bevor die Verhaltensexperimente näher erläutert werden, zunächst ein paar Beispiele, bei denen die virtuelle Realität zum Einsatz kommt.

Im Flugsimulator (Abb. 3(a)) können Piloten lernen, ein Flugzeug auf einem unbekanntem Flughafen sicher zu landen oder können besonders schwierige Landungen üben. Das Verhalten in ungewöhnlichen Situationen, wie z.B. dem Ausfall von Triebwerken oder auch Extremsituationen, kann trainiert werden, ohne Menschenleben zu gefährden und die teuren Maschinen zu beschädigen. Zudem ist ein Simulator bei der Ausbildung der Piloten preiswerter und effektiver. Auch bei der Umschulung auf andere (neuere) Maschinen können Simulatoren eingesetzt werden.

Im medizinischen Bereich (Abb. 3(b)) wird die virtuelle Realität, ähnlich wie beim Flugsimulator, zur Aus- und Weiterbildung verwendet. An einem virtuellen Körper können Operationen simuliert werden, so dass z.B. Medizinstudenten lernen und üben können, wie tief sie bei einer Operation schneiden müssen oder was zu tun ist, wenn Komplikationen auftreten, ohne die Patienten zu gefährden.



(a) Flugsimulator

(b) Virtuelle Realität in der Medizin

Abbildung 3: Anwendungsbeispiele von virtueller Realität. (Bilder aus: <http://www.uniklinik-duesseldorf.de>; [www.isr.uni-stuttgart.de](http://www.isr.uni-stuttgart.de))

Zukünftig könnten auch virtuelle Konferenzräume entstehen. Heutzutage haben große Firmen überall in der Welt Standorte und somit ist es meist schwierig alle Verantwortlichen an einen Tisch zu bekommen. Videokonferenzen tragen jetzt schon dazu bei, Dienstreisen zu verringern. Die virtuelle Realität könnte in Zukunft diese Konferenzen noch verbessern, indem z.B. alle Gesprächspartner in einem virtuellen Zimmer sitzen und die Stimmen aus der Richtung kommen, wie man es in der Realität erwarten würde (Precht et al., 2004).

Weitere Anwendungsgebiete findet man in der Architektur. Kunden können vor der Fertigstellung des Hauses durch die verschiedenen Räume des virtuellen Hauses gehen und Fehler in der Konstruktion können schneller erkannt

werden. Auch in der Autoindustrie, die so z.B. Entwürfe neuer Autos präsentiert oder Crashtests simulieren kann, findet virtuelle Realität immer mehr Verwendung.

Nun zurück zu den Verhaltensexperimenten. Verhaltensexperimente in der virtuelle Realität bieten den Vorteil, dass der Versuchsleiter die virtuelle Welt kontrollieren, sowie flexibel und einfach verändern kann. Dabei können Städte wie „Virtual Tübingen“ einer realen Stadt sehr ähnlich sein (Abb. 2) oder fiktive Städte wie Hexatown (Abb. 4(b); Gillner & Mallot, 1998) für das Experiment verwendet werden.



(a) Virtual Tübingen



(b) Hexatown

Abbildung 4: Beispiel für (a) eine rekonstruierte (van Veen et al., 1998) und (b) eine fiktive Stadt

Jedoch gibt es auch Nachteile, da bei einigen Personen „Simulation Sickness“ auftreten kann (Gillner et al, 2001). Diese Probanden fühlen sich während des Experiments nicht wohl, ihnen wird schwindelig und im schlimmsten Fall müssen sie sich übergeben. Eine wichtige Ursache hierfür ist die Disparität zwischen den Sinnen. Zum Einen erhält die Retina die Information vom optischen Fluss, also der Bewegung. Zum Anderen kann der Vestibularapparat keine körperliche Eigenbewegung feststellen. Diese „Ungleichheit der Informationen“ führt zu „Simulation Sickness“.

Die verschiedenen experimentellen Ansätze zur Erforschung der menschlichen Navigationsleistung und der Funktionalität von virtuellen Umgebungen lassen sich am Besten anhand des Virtual Reality-Würfel (Abb. 5; Gillner (1997)) beschreiben. Im Zusammenhang mit virtuellen Umgebungen sind Kontrolle, Interaktivität und Realismus von Bedeutung.

Die klassische **Psychophysik** untersucht die Beziehungen zwischen physikalischen Reizen und den durch sie hervorgerufenen Wahrnehmungen und Erlebnissen (Fechner, 1860). Hierbei werden die Methoden der Physik verwendet z.B. Wahrnehmungsschwellen und Reaktionszeiten. Die klassische Psychophysik stellt die Kontrollierbarkeit in den Vordergrund und verzichtet weitestgehend auf Realismus und Interaktivität. Die **Computergrafik**

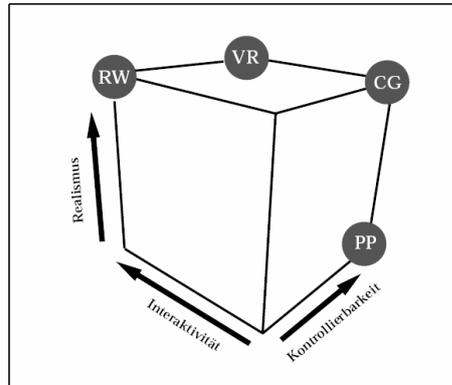


Abbildung 5: Der Virtual Reality Würfel (VR-cube) nach Gillner (1997) zeigt die Zusammenhänge zwischen der Psychophysik (PP), der Computergrafik (CG), der realen Welt (RW) und der virtuellen Realität (VR)

hingegen bietet komplexere Stimuli bei hoher Kontrollierbarkeit. Für komplexere kognitive Prozesse wie die Navigation ist auch die Wechselwirkung mit der Umwelt von Bedeutung. Die **Virtuelle Realität** vereinigt die Interaktivität mit der Kontrollierbarkeit der Psychophysik und dem Realismus der Computergrafik. Zahlreiche Möglichkeiten zur Interaktivität bieten sich auch bei Experimenten in der **realen Welt**, jedoch ist hier die Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit nicht immer gewährleistet.

**Kontrollierbarkeit:** In der realen Welt gibt es oft Probleme der Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen. Das Ergebnis eines Navigationsexperiments hängt von zahlreichen Faktoren ab, die der Experimentator nicht beeinflussen kann z.B. personenspezifischen Parametern wie das Vorwissen über eine reale Umgebung. Im Gegensatz dazu können in virtuellen Umgebungen gezielt Veränderungen vorgenommen werden, die in der realen Welt nur schwer möglich wären.

**Interaktivität:** Interaktivität bedeutet, dass die Handlungen des Probanden Rückwirkungen auf die dargestellte Simulation haben, das heißt, dass der Wahrnehmungs-Handlungs-Kreislauf geschlossen ist. Gale et al. (1990) zeigte, dass Probanden, die sich einen Weg in einer realen Welt einprägen sollten, diesen schneller lernten als durch das Ansehen eines Videofilms derselben Strecke. Auch Goldin und Thorndyke (1982) fanden Unterschiede zwischen dem Lernen durch eine reale Bustour und durch das Ansehen eines Videofilms dieser Bustour, heraus. Ein weiterer Vorteil der Interaktivität ist die Möglichkeit, messbares Verhalten direkt zu untersuchen wie z.B. Distanzschätzungen.

**Realismus:** Für die Navigationsexperimente benötigt man möglichst realitätsnahe Umgebungen. Aus diesem Grund sollte die virtuelle Welt so genau wie möglich, also mit möglichst vielen Details, nachgestellt werden. Die Computergrafik bietet echtzeitfähige Programme, die eine Bildwiederholungsrate von mindestens 20 Bildern pro Sekunde haben, was als kontinuierliche Fahrt wahrgenommen werden kann.

### 1.3.2 Geschichte der Computergrafik

Da das Erstellen von virtuellen Umgebungen erst durch die Computergrafik ermöglicht wird und deshalb von besonderer Bedeutung ist, zunächst ein kurzer Einblick in die Geschichte der Computergrafik. Die Computergrafik ist ein Teilbereich der Informatik, der sich mit der Erzeugung von Bildern durch einen Computer oder durch grafische Geräte beschäftigt. Die dadurch erzeugten Bilder nennt man auch Computergrafiken. Im Zweidimensionalen werden Bilder in der Ebene wie z.B. Linien, Kreise oder Polygone erzeugt und als Vektorgrafik, eine mathematische Beschreibung, oder Rastergrafik, die aus vielen Bildpunkten (Pixeln) besteht, dargestellt. Im Gegensatz dazu werden in der 3D-Computergrafik Objekte wie Kugeln oder Dreiecke im dreidimensionalen Raum beschrieben. Die Gesamtheit von geometrischen Formen, auch Primitiven genannt, Materialeigenschaften und Lichtquellen nennt man Szene. Die 3D-Computergrafik beschäftigt sich sowohl mit dem Entwurf und der Beschreibung (Modellierung) der Szene als auch mit der Erzeugung eines Bildes oder Films von dieser Szene.

In unserem alltäglichen Leben begegnet uns die Computergrafik fast überall. Wenn wir vor dem Computer sitzen, verwenden wir meistens grafische Benutzeroberflächen, im Fernsehen und Kino laufen computergenerierte Werbespots oder Filme mit vielen Spezialeffekten.

Da die Computergrafik in der virtuellen Realität in Echtzeitprogrammen verwendet wird, ist sie auch für diese Arbeit von Bedeutung. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die rasante Entwicklung der Computergrafik, basierend auf der technologischen Entwicklung der Rastergrafik-Hardware in den siebziger Jahren und leistungsfähigeren Grafikrechnern Ende der neunziger Jahre, gegeben werden, bevor ich dann näher auf OpenGL eingehen werde.

Um 1950 wurde der erste Nadeldrucker und Kathodenstrahlröhren-Bildschirm erfunden. Ein Kathodenstrahlröhren-Bildschirm basiert auf der Kathodenstrahlröhre oder auch Braun'schen Röhre von Ferdinand Braun und wird heute für Oszilloskope, Fernseher und PC-Bildschirme verwendet. Außerdem erschuf Jay W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (MIT) die erste Animation eines „springenden Balls“ auf einem Oszilloskop

(elektronisches Messgerät zur Darstellung des zeitlichen Verlaufes einer Spannung).

1961 entwickelte Ivan Sutherland am MIT im Rahmen seiner Dissertation das Sketchpad, ein Programm zum Erstellen von Grafiken mittels eines Lichtgriffels (ein Computer-Eingabegerät zum direkten Arbeiten auf einem Röhren-Bildschirm) und der Tastatur. Er entwickelte außerdem das erste Head-mounted Display und den Cohen-Sutherland-Algorithmus, ein Algorithmus zum Abgrenzen von Linien eines Rechtecks auf einem bestimmten Bereich.

Die erste SIGGRAPH- Tagung (Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques) der Association for Computing Machinery (ACM), die sich mit Computergrafik beschäftigt, fand 1973 statt und tritt seither jährlich zusammen.

1976 kam der erste Film, in dem eine Computergrafik verwendet wurde: „Futureworld“, in die Kinos. Danach schreitet die Geschichte der Computergrafik immer schneller voran. 1980 präsentierten IBM und Apple einen Rechner mit grafischer Oberfläche und der CGA-Standard (Color Graphics Adapter) wurde eingeführt, mit dem sich 320x200 Pixel mit 4 Farben darstellen lassen.

1982 kam der Film „Tron“ in die amerikanischen Kinos, der erste Film, in dem reine Computeranimationen verwendet wurden. Für eine weitere Optimierung der virtuellen Szenen sorgte 1984 Cindy Goral, die das Radiosity-Verfahren entwickelte, ein Verfahren zur realistischen Bildsynthese komplexer Szenen d.h. Licht, das eine Fläche empfängt und nicht absorbiert, muss diese wieder reflektieren. Außerdem kann eine Fläche auch selbstleuchtend sein.

1993 brachte die Silicon Graphics (SGI) OpenGL (Open Graphics Library), ein Application Programming Interface (API) zur Entwicklung von 3D-Computergrafiken auf den Markt und bot somit eine Softwareschnittstelle zu grafikfähiger Hardware. Ein großer Vorteil ist, dass dieses API unabhängig von Plattform und Programmiersprache ist. Der Vorteil der Plattform- und Sprachenunabhängigkeit war auch ein Grund OpenGL zur Generierung der Szene des Navigationsexperimentes in dieser Arbeit zu verwenden. Es kann also jede Programmiersprache benutzt werden, jedoch muss für jede spezielle Sprache auch eine Einbindung erfolgen, was durch spezielle Bibliotheken ermöglicht wird.

Zur Darstellung von zwei- und dreidimensionalen grafischen Objekten (Abb. 6) verwendet OpenGL einen oder mehrere Bildspeicher und je nach Anwendung weitere spezielle Speicher. Die grafischen Objekte werden entweder durch Raumpunkte beschrieben oder sie bestehen aus digitalisierten Bildern

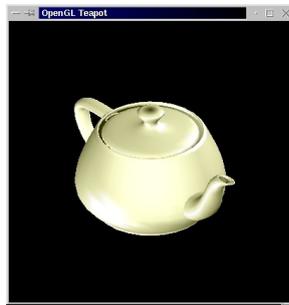


Abbildung 6: Ein Beispiel für ein in OpenGL erzeugtes 3D-Objekt. (Bild aus: [www.terrence.com](http://www.terrence.com))

in Form rechteckiger Pixelfelder. Die Entwicklungen von OpenGL werden durch ein Architecture Review Board (ARB), ein Gremium von Hardware- und Softwareherstellern, gesteuert und überwacht.

Bezüglich der Hardware stellt OpenGL hohe Anforderungen an die verschiedenen Speicherblöcke (Buffer). Als Mindestanforderung müssen für jede OpenGL-Implementierung ein Bildspeicher (Frame Buffer) für die Bilddarstellung, ein Tiefenspeicher (Depth Buffer) für die Sichtbarkeitsunterscheidung, ein Maskenspeicher (Stencil Buffer) für die Maskierung von Speicherbereichen und ein Akkumulationsspeicher (Accumulation Buffer) für den Bildaufbau, im Echtfarbmodus vorhanden sein. Diese Anforderungen werden zum größten Teil von der Grafikkarte übernommen. Kostete vor 15 Jahren ein Grafikkarte noch 1.000.000 Dollar, bekommt man heute schon Grafikkarten mit ähnlicher Leistungsfähigkeit für 200 Euro. Daraus ergeben sich für viele Forschungsgebiete, die die Computergrafik nutzen, ganz neue Möglichkeiten.

## 1.4 Navigationsforschung

### 1.4.1 Navigation

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter Navigation die Orts- und Kursbestimmung von Schiffen und Flugzeugen verstanden. Navigation bezeichnet danach Bewegungen um ein Ziel zu erreichen. Der einfachste Fall einer Navigation ist die Rückkehr zum Startpunkt („Homing“) mithilfe der Wegintegration oder visueller Suche. Voraussetzung hierfür ist, dass das Ziel erkannt werden kann, z.B. anhand von visuellen Markierungen oder Landmarken. Dies ist nur möglich, wenn ein Gedächtnis vorhanden ist. Eine Möglichkeit, Navigationsverhalten entsprechend verschiedener Komplexitätsstufen zu unterteilen, zeigt Abbildung 7 (Franz & Mallot, 1999).

Als lokomotorisches Verhalten werden Bewegungen bezeichnet, die zu einer Ortsveränderung des Beobachters führen. In Abbildung 7(a) ist die Naviga-

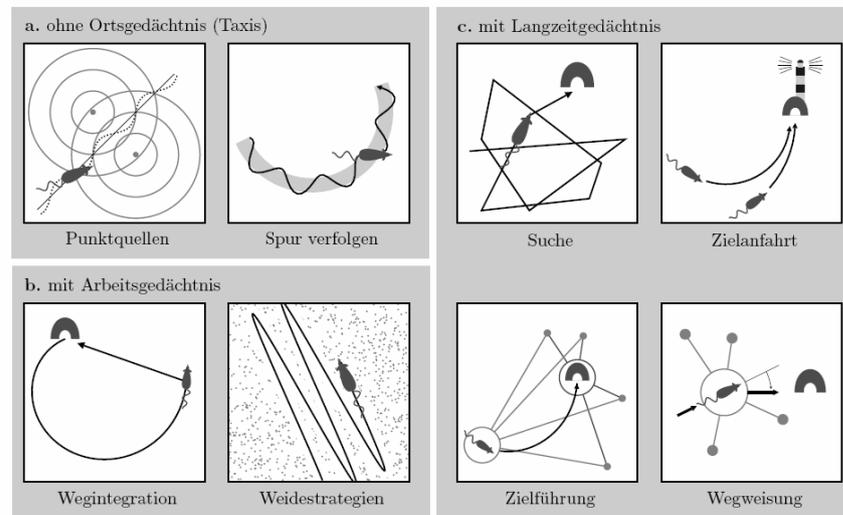


Abbildung 7: Übersicht über die elementaren Navigationmechanismen entnommen aus Franz & Mallot (1999)

tion ohne Ortsgedächtnis, eine sogenannte Taxi, die durch reflexartige Orientierungsreaktionen in einem Reizfeld gekennzeichnet ist, dargestellt. Hierbei wird der mit zwei Sensoren ausgestattete Organismus durch Reize dieser Sensoren geführt.

In Abbildung 7(b) wird ein Verhalten skizziert, bei dem Organismen ein Arbeitsgedächtnis besitzen und mithilfe von Wegintegration (Mittelstaedt, 1980; Müller & Wehner, 1988, Maurer & Sèguinot, 1995) navigieren. Diese Organismen sind in der Lage zu einem Ausgangspunkt, meistens auf dem kürzesten Weg, zurückzufinden.

Für diese Arbeit ist das Verhalten in Abbildung 7(c) am wichtigsten, da dort die verschiedenen Strategien, die später auch von den Probanden während des Navigationsexperiments angewendet werden, dargestellt sind. Diese Abbildung zeigt einen Organismus, welcher zusätzlich mit einem Langzeitgedächtnis ausgestattet ist, mit welchem das Ziel, z.B. anhand von visuellen Merkmalen, erkannt wird. Es gibt hierbei verschiedene Strategien:

- *Suche*: Die Landmarke dient als Wegweiser, um das Ziel, welches die Landmarke selbst ist, zu finden.
- *Zielanfahrt*: Die Landmarke ist mit dem Ziel verbunden und somit muss der Beobachter nur auf die Landmarke zugehen.
- *Zielführung*: Das Ziel ist nicht selbst markiert. Um trotzdem das Ziel zu erreichen, geht man zu einem Ort, von dem aus man einen Überblick

über die Anordnung der verschiedenen Landmarken hat (O'Keefe & Nade 1978; Trullier et al, 1997).

- *Wegweisung*: Voraussetzung sind Landmarken und die Information im Gedächtnis, was an einer bestimmten Landmarke getan werden muss, z.B. Richtungsentscheidung (O'Keefe & Nade 1978; Trullier et al, 1997).

### 1.4.2 Definition von Landmarken

Der Begriff der Landmarke ist für diese Diplomarbeit sehr bedeutend und wurde auch schon einige Male im Zusammenhang mit der Navigation erwähnt. Eine einheitliche Definition für Landmarken ist in der Literatur jedoch nicht zu finden und deshalb soll hier ein Überblick über die verschiedenen Ansätze gegeben werden.

Als einer der ersten befasst sich Lynch (1960) mit der Definition von Landmarken. Er definiert Landmarken als herausstechende Merkmale in einer Landschaft, wobei das Hauptmerkmal der Landmarken ihre Einmaligkeit ist. Lynch vergleicht Landmarken mit „nodes“, also Punkten oder strategischen Stellen einer Stadt, in welche der Beobachter hineinlaufen kann, z.B. eine Kreuzung. Im Gegensatz zu den „nodes“ können Landmarken nicht betreten werden (Referenzpunkt). Landmarken sind meistens einfach definierte Objekte wie Gebäude oder Berge. Sie können in lokale und globale Landmarken eingeteilt werden. Lokale Landmarken sind nur begrenzt, von einer bestimmten Richtung aus, sichtbar. Globale Landmarken hingegen sind von mehreren Richtungen, Distanzen und über andere Objekte hinweg sichtbar. Meistens sind globale Landmarken bekannte Objekte und stehen innerhalb der Stadt oder in einiger Distanz, wie z.B. Türme, goldene Kuppeln oder große Hügel.

Appleyard (1970) bestätigt, dass Landmarken leicht benennbar und gut erinnerbare Gebäude sind, welche oft zur Orientierung benutzt werden und eine wichtige symbolische Funktion haben. Scharfe Umrisse und eine besondere Größe im Gegensatz zur Umgebung unterstützen dies.

Siegel und White (1975) bezeichnen Landmarken als „perceptual events“ und betonen damit, dass eine Landmarke etwas ist, was erinnert wird. Dies bedeutet, wenn jemand ein Haus für die Navigation nutzt und sich erinnert, wird dieses Haus als Landmarke wahrgenommen.

Cohen und Schuepfer (1980) betonen den funktionellen Aspekt, dass heißt, dass ein Objekt erst zur Landmarke wird, wenn es für die Navigation genutzt wird. „Landmarks are unique visual configurations which are used as course-maintaining aids“. Cohen und Schuepfer teilen Landmarken in richtige und

falsche Wegweiser, sowie in Landmarken, die für die Richtungsentscheidung nicht von Bedeutung sind, ein.

Presson und Montello (1988) verwenden die Begriffe „symbolische“ und „entfernte“ Landmarken. Symbolische Landmarken, also lokale Landmarken, definieren sie als Objekte in einer Umgebung, die als Kennzeichen für diesen Ort dienen, z.B. der Kölner Dom. Entfernte Landmarken, also globale Landmarken, sind solche, die in weiterer Entfernung liegen und dennoch eine Orientierung ermöglichen, z.B. eine Bergspitze.

In dieser Arbeit wird eine Landmarke als eine stetige Bezugsmarke, welche bei der Orientierung in einem Raum und der Zielführung in einem Navigationsexperiment helfen kann, bezeichnet. Ergänzend wird die Einteilung der Landmarken in lokale und globale Landmarken von Steck und Mallot (2000) verwendet. Globale Landmarken sind über einen weiten Bereich sichtbar und können als Kompass genutzt werden, z.B. Berge, Skylines. Ihre relative Position verändert sich nicht, wenn der Beobachter sich etwas von der Stelle entfernt. Lokale Landmarken sind nur von einer kurzen Distanz aus sichtbar, wie Häuser, Telefonzellen usw., bewegt sich der Betrachter, verändert sich die relative Position der lokalen Landmarken stark. Wie Probanden die Landmarken auswählen, hängt von dem Nutzen in der Navigationsaufgabe ab, was zwischen verschiedenen Aufgaben und Probanden variieren kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es mehrere Definitionen von Landmarken gibt. Landmarken sind oft wahrgenommene und gemerkte Objekte und Anordnungen von Objekten, welche die Fähigkeit haben, die Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen. Eine Landmarke sollte beständig und charakteristisch sein.

### 1.4.3 Topologische Navigation

Die Topologie beschäftigt sich mit der Lehre von Nachbarschaftsbeziehungen in Mengen. In endlichen Mengen stellen Graphen die Nachbarschaftsbeziehungen vollständig dar. Ein Graph im Sinne der Graphentheorie ist ein Paar  $(V, E)$ , wobei  $V$  die Menge der Knoten und  $E$  die Menge der Kanten ist. Jede Kante ist eine zweielementige Teilmenge von  $V$ , die grafisch durch eine Verbindungslinie zwischen den beiden Knoten veranschaulicht wird.

Das Routengedächtnis lässt sich durch eine Aneinanderkettung von einzelnen Wegweisemechanismen erklären. Man gelangt zu einer kognitiven Karte, dem Aussagewissen, welches die zielabhängige Flexibilität beinhaltet, wenn man statt linearer Ketten von Wegweisungen Netzwerke oder Graphen davon betrachtet. Knoten stehen für erkannte Landmarken und Kanten für Aktionen, die von einem Platz zum nächsten führen. Die Kanten enthalten Informationen über die beiden Knoten, die sie verbinden. Es werden nicht

nur Informationen darüber gespeichert, wie man an einer bestimmten Landmarke reagieren muss, sondern auch eine Erwartung, zu welcher weiteren Landmarke man danach kommt. Diese zusätzliche Information ist zum Planen von Routen sehr wichtig.

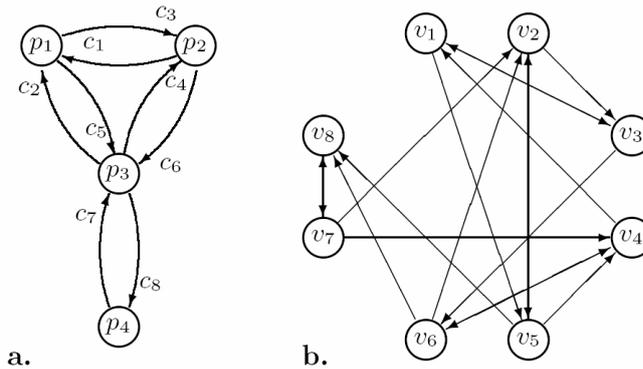


Abbildung 8: (a) Der Platzgraph beinhaltet Informationen unabhängig von der Blickrichtung. (b) Der Ansichtsgraph hingegen besitzt richtungsabhängige Informationen.

Abbildung 8 zeigt ein Beispiel für einen Platz- und Ansichtsgraph. Im Platzgraph können Knoten Plätze oder Orte im Raum dargestellt, die Informationen darüber enthalten, an welchem Platz man sich befindet, unabhängig von der Blickrichtung. Die Kanten können als die Bewegungen, um zum nächsten Platz zu kommen, aufgefasst werden. Am nächsten Knoten muss dann wieder die Entscheidung getroffen werden, in welche Richtung man weitergeht. Für die Richtungsbestimmung müsste man zusätzlich einen Kompass verwenden. Eine andere Möglichkeit der Darstellung ist der Ansichtsgraph. Auch hier repräsentieren die Knoten Plätze oder Orte, jedoch ist die Ansicht diesmal richtungsabhängig, das heißt, dass jeder Knoten eine andere Blickrichtung repräsentiert. Die Kanten geben die zeitliche Abfolge der Ansichten beim Durchlaufen der Umgebung wieder. Der Ansichtsgraph enthält die gleichen Informationen wie der Platzgraph und hat den Vorteil, dass kein Kompass benötigt wird, da die Kante die Richtungsinformation bereits enthält und man somit nicht entscheiden muss, in welche Richtung man gehen muss, um zum nächsten Ziel zu kommen.

#### 1.4.4 Neurophysiologie des Ortsgedächtnisses

Der Hippocampus wird häufig mit dem Ortsgedächtnis in Verbindung gebracht. Dies wurde neurophysiologisch anhand von Navigationsexperimenten in einem virtuellen Labyrinth beobachtet (Maguire, 1997).

O'Keefe und Dostrovsky fanden bereits 1971 bei elektrophysiologischen Untersuchungen am Hippocampus von Ratten heraus, dass diese über sogenannte „Platzzellen“ verfügen, die stets feuern, wenn sich die Ratte an einer bestimmten Stelle im Raum aufhält, unabhängig von der Richtung (O'Keefe & Nadel 1978; Eichenbaum, 1996).

Dies gilt bis jetzt jedoch nur für Ratten. Bei Primaten konnten bisher keine Platzzellen nachgewiesen werden. Sie verfügen allerdings über sogenannte „Ansichtszellen“, bei denen der Blickwinkel und nicht die Position des Betrachters von Bedeutung ist (Rolls et al., 1998). Zusätzlich spielen bei ihnen neben dem Hippocampus auch andere Gehirnstrukturen bei Navigationsaufgaben eine Rolle.

## 1.5 Augenbewegungen

Wie bereits beschrieben, wird in der klassischen Psychophysik meist sehr einfaches Verhalten untersucht und dabei, z.B. Knopfdrücken als objektives Verhaltensmaß benutzt. Augenbewegungen können helfen, auch komplexeres Verhalten zu analysieren. Interessante Fragen hierbei sind, welche Bildinhalte über Blicksprünge hinweg im Gedächtnis bleiben oder wie die Fixationsmuster die Wahrnehmung beeinflussen (Yarbus, 1967). Die Analyse der Augenbewegungen kann helfen, den Verlauf während einer räumlichen Kognitionsaufnahme besser zu verstehen, daher werden auch in dieser Arbeit Augenbewegungen untersucht.

In einigen Studien wurde die Rolle der Augenbewegungen in Alltagssituationen erforscht. Jovancevic (2006) und Lappe & Hoffmann (2000) untersuchten das Verhalten beim Autofahren und Laufen, Johansson (2001) bei einer Augen-Hand-Koordinationsaufgabe und Land und Hayhoe (2001) bei Aktivitäten im alltäglichen Leben. In allen Fällen richtet sich der Blick auf das Objekt, welches für die aktuelle Aufgabe von Bedeutung ist. Egal, ob man eine Tasse Tee zubereitet oder farbige Bücher nach einer Vorlage anordnet. Die Augen suchen das zu benutzende Objekt, legen die Richtung fest, überwachen die Bewegungen der Objekte und kontrollieren, ob die Aufgabe erledigt wird. In solchen Fällen erreichen die Augen also das Ziel immer, bevor die eigentliche Handbewegung ausgeführt wird und kontrollieren den Ablauf (Hayhoe, 2001; Triesch et al., 2003). Bei diesem natürlichen Verhalten ist die Salienz, Auffälligkeit der Objekte, nicht besonders wichtig (Turano et al., 2001; Kayser et al., 2006)

### 1.5.1 Arten von Augenbewegungen

Augenbewegungen umfassen sowohl Bewegungen des Augapfels, als auch Lidschluss- und Pupillenmotorik (Galley, 2001). Das menschliche Auge (Abb.

9) ist in der Lage, eine Vielzahl unterschiedlicher Bewegungen (Horizontal-, Vertikal- und Drehbewegungen) auszuführen, die durch 3 Muskelpaare ermöglicht werden.

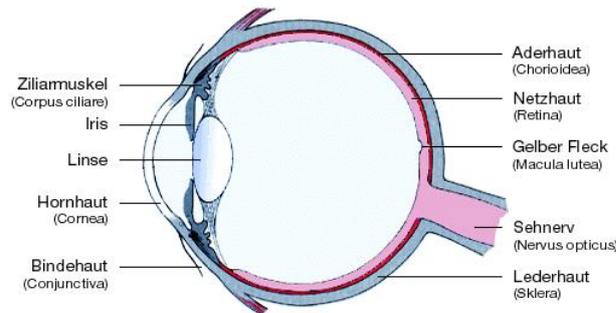


Abbildung 9: Physiologische Ansicht des menschlichen Auges (Bild aus: [www.bebig.de](http://www.bebig.de))

Das gesamte Sehfeld eines Auges umfasst einen Kegel von etwa  $100^\circ$  (Schandry, 1989), jedoch ist der Bereich des scharfen Sehens deutlich kleiner. Dieser Bereich des schärfsten Sehens wird Fovea Centralis (gelber Fleck) genannt und befindet sich ungefähr in der Mitte der Retina (Netzhaut). Hier ist die Dichte der lichtempfindlichen Rezeptoren, besonders der Zapfen, welche für das Farbsehen zuständig sind, am größten, so dass die Einzelheiten eines betrachtenden Objekts besonders gut wahrgenommen werden können. Schärfstes Sehen ist in einem Winkel von  $1^\circ$  um das fixierte Objekt möglich. Weiter entfernt liegende Objekte werden mit geringerer Auflösung und Farbtintensität auf der Retina abgebildet. Bereits bei einer Abweichung von  $3^\circ$  vermindert sich die Sehschärfe um die Hälfte. Da das Wegdriften der Augen nicht zu vermeiden ist und das Bild unscharf wird, sind Augenbewegungen wichtig, um dies zu korrigieren und somit scharfes Sehen zu ermöglichen. Hierbei gibt es verschiedene Fälle, die unterschieden werden:

**Blickwechsel von einem Objekt zu einem anderen:** Eine oder mehrere Sakkaden, also zielsuchende Bewegungen des Auges, richten die Fovea auf das neue Objekt aus.

**Augen folgen einem bewegten Objekt:** Bewegt sich das Objekt langsam, kann das Auge mit einer langsamen, gleitenden Folgebewegung (smooth pursuit) dem Objekt folgen. Bei höherer Geschwindigkeit des Objekts sind Sakkaden notwendig.

**Augen gleichen Bewegungen des Körpers bzw. Kopfes aus:** Diese Augenbewegungen werden vestibuläre Augenbewegungen genannt und die-

nen der Anpassung bei anhaltender Fixierung eines Punktes bei Kopf- und Körperbewegungen. Langsame Gleitbewegungen wechseln sich mit schnellen Rückstellbewegungen ab.

Als Sakkaden werden schnelle Augenbewegungen bezeichnet, um von einem Fixpunkt zum nächsten zu gelangen. Sie werden entweder spontan, durch gezielte Aufnahme von Umweltinformationen oder unwillkürlich, etwa durch Veränderungen am Rande des Gesichtsfeld, ausgelöst (Mickasch, Haack, 1986). Während der Sakkade ist das visuelle Wahrnehmungsvermögen eingeschränkt (Volkman, 1979; Chekaluk & Llewellyn, 1994) und somit werden nur vermindert visuelle Informationen aufgenommen.

Während einer Fixation hingegen versuchen die Augen den Blick auf ein bestimmtes Objekt zu stabilisieren und wichtige Informationen aufzunehmen. Die Dauer und Muster von Fixationen sind von den verschiedenen Aufgaben abhängig, und für jede Situation spezifisch. Fixationen haben eine Dauer von 100 – 2000 ms, jedoch liegen die meisten Fixationen im Bereich von 200 – 600 ms (Karsh, Breitenbach, 1983; Young, Sheena, 1975). Häufig kann ein Zusammenhang zwischen der Fixationsdauer und der Aufnahme bzw. der Verarbeitung der Information, welche von dem fixierten Objekt ausgeht, hergestellt werden. Studien zeigen, dass die Fixationsdauer an informationsreichen Objekten länger ist als an informationsarmen. Da während einer Sakkade das Sehvermögen reduziert ist, findet die visuelle Informationsaufnahme fast ausschließlich während der Fixationen statt. In vielen Untersuchungen wird daher davon ausgegangen, dass die Information, die während einer Fixation aufgenommen wird, unmittelbar verarbeitet wird. Unter dieser Annahme ist also die Fixationsdauer identisch mit der Dauer der Informationsverarbeitung (Inhoff, Radach, 1998).

Neben Fixationen und Sakkaden gibt es auch Mikrobewegungen. Diese Bewegungen treten bei jeder Fixation auf und lassen sich in Drift, Tremor und Mikrosakkaden untergliedern. Wie jede andere Nervenzelle auch, reagieren die Stäbchen und Zapfen auf der Retina primär auf Veränderungen. Wird dem Auge ein konstantes Bild dargeboten, verschwindet allmählich das wahrgenommene Bild durch Rezeptorermüdung (Habituation).

Als Drift bezeichnet man das langsame Abgleiten des Auges vom Fixationsort. Dadurch verschiebt sich das Bild auf der Retina um mehrere Sehzellen. Somit trifft der Lichtreiz stets auf unterschiedliche Nervenzellen, und die Sensitivität gegenüber dem Objekt wird aufrechterhalten.

Mikrosakkaden korrigieren, die durch Drift verursachte Verschiebung und tragen so zu einer Refixierung des Objekts bei. Allerdings treten sie auch teilweise unwillkürlich auf und können das Auge von fixierten Objekten wegführen.

Der Tremor bezeichnet die kleinsten, zitterartigen Bewegungen (unter einer Bogenminute) mit Frequenzen von etwa 50 Hz (Wolf, 1990). Der Tremor verursacht eine Verschiebung des Bildes der Retina um einen Bereich von 5 bis 10 Sehzellen. Der Tremor ist also wie der Drift dafür verantwortlich, dass die Nervenzellen mit neuen Reizen versorgt werden.

### 1.5.2 Messen von Augenbewegungen

Um die Augenbewegungen zu messen, stehen mehrere Methoden zur Verfügung.

Eine Methode wäre die Messung des Elektrookulogramms (EOG) mittels am Auge angebrachter Elektroden über spezielle Kontaktlinsen oder seitlich am Auge angebrachte Metallplättchen, die ein elektromagnetisches Feld aussenden, welches wiederum in der Nähe des Auges registriert wird.

Eine andere Methode ist die magnetische Induktion, bei welcher dem Probanden ebenfalls eine Kontaktlinse ins Auge gelegt wird. Diesmal enthält die Kontaktlinse jedoch einen sehr dünnen Draht als Spule. Um den Kopf des Probanden werden zwei große, aufeinander senkrecht stehende Magnetfelder erzeugt. Dadurch entsteht in der Spule ein Induktionsstrom, dessen Größe dem Winkel zwischen Spule und Magnetfeld entspricht. Eine technisch weniger aufwendige Methode ist die Videomethode. Hierbei werden Videoaufnahmen des Auges über Aufnahmen der Szenerie gelegt, wodurch eine Zuordnung von Objekten und Augenbewegungen möglich ist. In dieser Arbeit wird die Cornea-Reflex-Methode verwendet, dabei wird ein auf das Auge gelenkter Infrarotstrahl von der Cornea reflektiert und über einen Spiegel von einer Kamera aufgezeichnet. Eine detailliertere Beschreibung dieser Methode ist im „Material und Methoden“ Teil zu finden.

Anwendungen der Augenbewegungsregistrierung, im Folgenden als Eye Tracking bezeichnet, findet man z.B. bei der Erforschung von Benutzerfreundlichkeit von Internetseiten, in der Werbung, aber auch bei der Sekundenschlafkontrolle im Auto.

## 1.6 Fragestellung

Die Kybernetik beschäftigt sich mit der Wechselwirkung zwischen dem Menschen und seiner Umwelt. Um diese Interaktionen und das kognitive Verhalten besser zu verstehen, verwendet man nicht wie in der klassischen Psychophysik einfaches Verhalten, wie z.B. das Knopfdrücken, sondern nutzt virtuelle Realitäten und die Messung von Augenbewegungen, um komplexeres Verhalten zu untersuchen (z.B. Navigationsleistungen).

Der Hintergrund dieser Arbeit ist die Dissertation von S. Steck „Integration verschiedener Informationsquellen bei der Navigation in virtuellen Umgebun-

gen“ (2000). Das Ziel dieser Arbeit war es, die Rolle von lokalen (z. B. ein Haus am Wegrand) und globalen (z.B. Berge im Hintergrund) Landmarken, anhand eines Navigationsexperiments in einer virtuellen Umgebung zu erforschen. Die Ergebnisse von S. Steck zeigten, dass die Probanden beide, lokale und globale Landmarken, bei der Entscheidung in der Wegfindaufgabe benutzen und auch verschiedene Strategien an den verschiedenen Kreuzungen und Zielrichtungen anwenden.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird das Experiment von S. Steck nachgestellt, jedoch werden zusätzlich Augenbewegungen gemessen. Das Ziel ist, anhand der Augenbewegungen herauszufinden, ob es eine Korrelation zwischen der Häufigkeit bzw. Dauer der Fixationen und dem Verhalten während der Wegfindaufgabe gibt. Nebenbei soll untersucht werden, ob die Ergebnisse mit denen von Steck's Arbeit übereinstimmen, welcher Typ von Landmarke bevorzugt wird und welche Strategien die Probanden benutzt haben (nur globale Landmarken, nur lokale Landmarken, beide Typen von Landmarken oder Wegintegration (z.B. rechts, rechts, links)).

Eine Hypothese ist, dass ein Proband häufiger und länger (Jin, 2007) auf ein Objekt schaut, welches er für seine Orientierung und somit für seine Bewegungsentscheidung verwendet. Eine andere Hypothese ist, dass der Proband das Objekt, welches für seine Bewegungsentscheidung relevant ist, als letztes fixiert, bevor er sich entscheidet. Anhand der Augenbewegungen sollen diese Vermutungen analysiert werden. Wenn es eine Korrelation zwischen den Augenbewegungen und der Bewegungsentscheidung geben würde, dann könnte man mithilfe der Augenbewegungen Landmarken identifizieren.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Material

#### 2.1.1 Versuchsaufbau



Abbildung 10: Der Proband, ausgerüstet mit Eye- und Headtracker auf dem Kopf, sitzt vor der Projektionsleinwand, auf welche die virtuelle Umgebung projiziert wird.

Abbildung 10 zeigt den Versuchsaufbau des Experiments. Der Proband sitzt auf einem Autositz vor einer Projektionsleinwand, hat einen Eye- und Headtracker auf dem Kopf, damit die Augen- und Kopfbewegungen gemessen werden können, und eine Tastatur auf dem Schoß, um durch den virtuellen Raum zu navigieren. Ein sogenanntes Kopftarget wird durch einen Magneten auf dem Eyetracker befestigt. Es besteht aus reflektierenden Kugeln, die mithilfe von sechs Infrarotkameras (Abb. 11), die im Raum verteilt sind, die Position des Kopfes bestimmen. Der Proband wird durch den Eye- und Headtracker nur unwesentlich in seiner Sicht- und Bewegungsfreiheit eingeschränkt.



Abbildung 11: Eine der sechs Infrarotkameras im Raum, die für das Aufnehmen der Kopfbewegungen genutzt wurden.

Für das Experiment ist nicht nur das horizontale Blickfeld (field-of view (FOV)), sondern auch das vertikale, von Bedeutung. In den meisten Anwendungen ist der horizontale Öffnungswinkel größer als der vertikale, obwohl der physiologische Blickwinkel für Azimuth- und Elevationwinkel (Abb. 12) mit  $\pm 90^\circ$  fast gleich ist. Die hier verwendete Projektionsleinwand ist ein Kegelausschnitt von  $150^\circ$  in horizontaler Richtung und  $70^\circ$  in vertikaler Richtung. Sie hat eine Höhe von 2 m und einen Neigungswinkel von  $15^\circ$ . Die Augenhöhe des Probanden beträgt 1.20 m und der Augenabstand zur Leinwand bei horizontaler Blickrichtung 1.62 m.

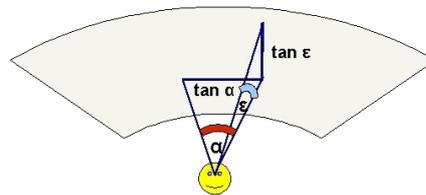


Abbildung 12: Skizze der Leinwand. Der Smilie markiert die Position des Probanden. Azimuth- und Elevationswinkel: Der horizontale Winkel wird Azimuth, der vertikale Elevation genannt.

Der Experimentaufbau läuft auf einem Pentium4 Computer (Intel Pentium4, 2.6 GHz, RAM: 2x 512 MB) mit einem Linux RedHat 9.0 Betriebssystem. Die Grafikkarte ist eine NVIDIA Quadro4 (NVIDIA Quadro4(TM) 980XGL 128-MB DDR SDRAM) mit zwei dualen Monitorverbindungen.

Das Bild auf der Leinwand wird mit zwei LCD Projektoren, Sanyo PLC-XU46 mit 3 LCD panels, Auflösung: 1024x768 Pixel, dargestellt. In der Mitte der Projektionsleinwand überschneidet sich das Bild von beiden Projektoren. Um dies zu korrigieren, wurde ein kleiner Teil von der Linse der Projektoren durch eine Metallplatte abgedeckt (Abb. 13).



Abbildung 13: Foto von einem der zwei Projektoren, der das Bild auf der Leinwand erzeugt. Die Linse wird zum Teil durch eine Metallplatte abgedeckt, um die Überschneidung der beiden Projektionsbilder zu vermindern.

### 2.1.2 Eye- und Headtracker

Die Augenbewegungen wurden mit einem mobilen Eyetracker gemessen. Es wurde das Modell von ASL (Applied Science Laboratories) Model 501 eye tracker verwendet. Dieser Eyetracker benutzt die Cornea-Reflex-Technik, um die Augenbewegungen aufzuzeichnen. Die erste Komponente des Eyetracker-systems (Abb. 14) ist eine am Kopf befestigte Optik. Sie besteht aus einem Infrarot-Illuminator (Lichtquelle), einer Augenkamera (Infrarotkamera) und einer Szenenkamera.



Abbildung 14: Head- und Eyetracker werden mit Hilfe eines verstellbaren Bandes am Kopf des Probanden fixiert.

Bei der Cornea-Reflex-Methode leitet eine Plexiglasscheibe einen Infrarotstrahl zum linken Auge und da die Oberfläche der Cornea feucht ist und somit glänzend, entsteht ein punktförmiger Lichtreflex. Dieser Cornea-Reflex wird als erstes Purkinje Bild bezeichnet und zusammen mit der Position der Pupille von der Augenkamera aufgezeichnet. Dabei steht die Position des Cornea-Reflexes aufgrund der besonderen Form des Augapfels eindeutig mit der Position der Pupille in Zusammenhang. Da sowohl der Cornea-Reflex als auch die Pupille auf dem Monitor (Abb. 15 linker Monitor) als weiße Punkte erscheinen, kann der Prozessor von ASL sie nur durch ihre Größe unterscheiden. Beide werden anhand eines Schwellenwertes erkannt. Aus dieser Kombination von Purkinje- und Pupillenposition kann nach der Kalibrierung die eindeutige Blickrichtung bestimmt werden. Diese Messung ist relativ unabhängig von den Lichtverhältnissen in der Umgebung und der Proband wird nur geringfügig im Sehen beeinträchtigt, da er das Infrarotlicht nicht sehen kann.



Abbildung 15: Foto des verwendeten Equipments: Die beiden linken Monitore zeigen die Bilder von Augen- und Szenenkamera. Auf dem rechten Monitor sieht man die Eyetracker-Software.

Eine weitere Kamera, die Szenenkamera ist in Stirnhöhe angebracht und nimmt einen Ausschnitt von ca.  $40^\circ \times 35^\circ$  der Umwelt auf, der dem zentralen Sehfeld des Probanden entspricht (Abb. 15 mittlerer Monitor). Die Videosignale von Augen- und Szenenkamera werden mit einer Sampling Rate von 60 Hz zum ASL Prozessor, der Kontrolleinheit, gesendet, die mit einem externen Computer verbunden ist.

**Kalibrierung des Eyetrackers:** anhand eines schwarzen Fadenkreuzes auf dem Bildschirm der Szenenkamera (Abb. 15 mittlerer Monitor) wurde der aktuelle Blick des Probanden visualisiert. Die Position des Fadenkreuzes musste zuerst kalibriert werden. EYEPOS operative Software bietet eine Benutzeroberfläche für die Kalibrierung und die Aufzeichnung (Abb. 15 rechter Monitor). Der Eyetracker hat eine Genauigkeit von  $\pm 0.5^\circ$  im Zentralfeld. Durch die Kalibrierung wurde die Augenposition mit dem Bild, das die Szenenkamera von der Umwelt lieferte, in Verbindung gebracht. Dazu wurden neun Kalibrierungspunkte auf der Leinwand zu Hilfe genommen. Der Proband wurde gebeten, seinen Kopf während der Kalibrierung nicht zu bewegen. Die Vektordifferenzen zwischen dem Zentrum der Pupille und der Corneareflection (erstes Purkinje Bild) wurden aufgezeichnet, wenn der Proband jeweils einen der neun Punkte fixierte. Nach der Kalibrierung wurde der Proband erneut aufgefordert die neun Kalibrierungspunkte zu fixieren; lagen Fadenkreuz und Punkt jeweils übereinander, wurde die Kalibrierung abgeschlossen, andernfalls wiederholt. Die Kalibrierung dauerte ca. 20 Minuten. Zwischen den verschiedenen Abschnitten des Experimentes folgte eine Überprüfung der Kalibrierung, bei der der Proband ein Kreuz in der Mitte der Leinwand fixieren sollte. So konnten eventuelle Fehler, die durch das Verrutschen des Eyetrackers entstanden sind, in der Auswertung verrechnet werden.

**Kalibrierung des Headtrackers:** Auch der Headtracker musste vor Beginn des Experiments kalibriert werden. Der Proband sollte dabei den Kopf

nicht bewegen und eine reflektierende Targetkugel an seine Nasenwurzel halten. Durch diese Kalibrierung wurde festgelegt, dass der Blick auf die Mitte der Leinwand mit Azimuth = 0 und Elevation = 0 gerichtet wurde. Dieser Blick wurde als Referenzblick für alle weiteren Messungen definiert.

**Handhabung des Eyetrackers:** Der Eyetracker wiegt etwa 500 g und wird mittels zweier Bänder, deren Umfang mit einer Schraube reguliert werden kann, auf dem Kopf des Probanden fixiert. Um eine verlässliche Messung zu erhalten, war es wichtig, dass die Szenenkamera während des ganzen Versuchs an derselben Position blieb, die sie während der Kalibrierung hatte. Aus diesem Grund musste die Schraube des Eyetrackers relativ stark angezogen werden, damit das Gerät nicht verrutschte. Jedoch musste darauf geachtet werden, dass die Schraube nicht zu fest angezogen wurde, da der Proband sonst nach kurzer Zeit Kopfschmerzen bekam.

Ein weiteres Problem waren Sehhilfen wie Brille und Kontaktlinsen. Bei zu hoher Dioptrienzahl wird der Infrarotstrahl durch die Kontaktlinse so stark gestreut, dass die Leuchtkraft nicht mehr ausreicht, um das System die Pupille erkennen zu lassen. Darum wurden nur Kontaktlinsenträger mit geringer Dioptrienzahl ausgewählt. Bei Brillen wurde zum Teil das Infrarotlicht durch den Brillenrand verdeckt und so fiel zu wenig Licht ins Auge. Zusätzlich war das kalibrierbare Feld kleiner als ohne Brille. Aus diesem Grund wurden nur Probanden, die keine Brille trugen, zu dem Experiment eingeladen.

Zu Messausfällen kam es zum einen, wenn der Proband seine Augen schloss, z.B. beim Blinzeln. Diese Fehler wurden sofort durch den Eyetracker verrechnet. Das Fadenkreuz blieb in solchen Fällen für 4 Videobilder (200 ms bei 60 Hz) stehen und sprang dann zu der Standardposition (0,0) zurück. Messfehler konnten zum anderen bei extremen Augenbewegungen auftreten. Der Cornea Reflex lag dann nicht mehr auf der Cornea und eine undefinierte Lichtspiegelung auf dem Augapfel wurde anstelle des Cornea Reflexes aufgenommen. Reimer und Sodhi (2006) berichten von ähnlichen Problemen bei der Verwendung von Eye- und Headtracker während eines Experiments.

Das Bild der Szenenkamera wurde mit einem Mini-DV Tape mithilfe eines Sony Videorecorder aufgenommen und mit der Adobe Premier Software auf den Computer übertragen. Der Videofilm wurde später für die Videoanalyse und den Vergleich von automatischer und manueller Auswertung verwendet (siehe Abschnitt 2.3).

Die so erhaltenen Daten sind unverarbeitete Rohdaten und werden im Folgenden als Sehstrahlen bezeichnet. Sie geben wieder, wann der Proband in welche Richtung geschaut hat. Aus diesen Sehstrahlen geht nicht hervor, ob

es sich um Fixationen, Sakkaden oder Fehler in der Messung handelt.

### 2.1.3 Probanden

Für dieses Experiment wurden Augenbewegungen von 17 Probanden gemessen. Die Probanden waren männliche Studenten und Doktoranden der Universität Tübingen im Alter von 20 - 32 Jahren. Die Teilnahme an diesem Experiment war freiwillig und den Probanden wurde für die Teilnahme acht Euro pro Stunde gezahlt. Alle Probanden hatten keine oder nur sehr geringe Sehschwächen und konnten ohne Brille, in einigen Fällen jedoch mit Kontaktlinsen, am Experiment teilnehmen.

## 2.2 Methoden

### 2.2.1 Virtuelle Umgebung: Hexatown



Abbildung 16: Hexatown besteht aus regulären hexadiagonal angeordneten Straßen. An den Kreuzungen treffen immer drei Straßen in einem  $120^\circ$  Winkel aufeinander.

Das Navigationsexperiment wurde in einer virtuellen Umgebung, Hexatown (Gillner & Mallot, 1998), durchgeführt. Hexatown (Abb. 16) besteht aus regulären hexadiagonalen Flächen mit Straßen, Kreuzungen und Landmarken. Die Entfernung zwischen zwei Kreuzungen beträgt 100 m. Eine Kreuzung ist aus drei angrenzenden Straßen zusammengesetzt, die aus  $120^\circ$  Winkeln besteht. An jeder Kreuzung sind drei lokale Landmarken in jeder Ecke zu sehen (Abb. 17). Um zu verhindern, dass die Probanden die Landmarken an entfernten Kreuzungen sehen, sind eine Reihe von Bäumen um die Kreuzungen platziert. Außerdem sind die Straßen nicht eben, das heißt, dass zwischen zwei Plätzen jeweils ein Hügel überwunden werden muss. Der hexagonale Grundriss und die identischen Kreuzungen verhindern räumliche

Informationen vom geometrischen Erscheinungsbild. Die Fassaden der Objekte bestehen zum Teil aus Bildern von realen Gebäuden. Die virtuelle Umgebung und die Objekte wurden mit Hilfe von Multigen Creator Software erstellt. Die Szenerie wurde mit OpenGL Performer Simulationssoftware mit einer update Rate von 60 Hz übersetzt. OpenGL als Softwareschnittstelle ist primär unabhängig von der verwendeten Hardware. Dadurch lassen sich Anwendungen relativ leicht auf andere Hardwareplattformen portieren.

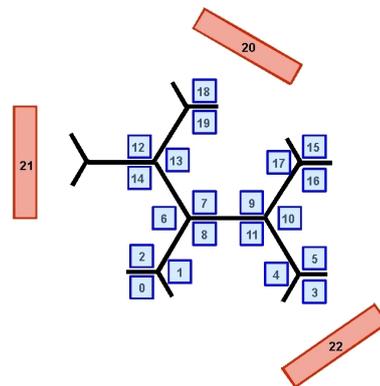


Abbildung 17: Diese Skizze zeigt Hexatown mit den Positionen der lokalen und globalen Landmarken. Die Straßen sind in schwarz und die Landmarken als Rechtecke dargestellt, wobei blau für die lokalen und rot für die globalen Landmarken steht.

Auch S. Steck verwendete in ihrer Arbeit Hexatown, jedoch wurden in der vorliegenden Arbeit einige Veränderungen vorgenommen. Eine der größten Veränderungen war, dass die globalen Landmarken ausgewechselt wurden. S. Steck hatte eine Bergspitze, eine Skyline und einen Leuchtturm als globale Landmarken verwendet. Diese wurden durch drei verschiedene Skylines: Frankfurt, Sydney und Toronto (Abb. 18) ersetzt, da diese schneller zu erkennen, einfacher zu merken und den meisten Probanden bekannt waren.



Abbildung 18: Die Skylines von Frankfurt, Sydney und Toronto wurden um Hexatown herum platziert und dienen als globale Landmarken.

Die lokalen Landmarken blieben unverändert. Bei ihnen handelte es sich in den meisten Fällen um Häuser, aber auch um LKWs und Campingplätze. Einige Beispiele der lokalen Landmarken sind in Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: Hier werden einige lokale Landmarken exemplarisch dargestellt.

### 2.2.2 Versuchsablauf

Das Experiment unterteilte sich in vier verschiedene Phasen: Trainingsphase I zum Kennenlernen der virtuellen Stadt, Trainingsphase II als Vorbereitung für den Test, die Testphase und eine Orientierungsphase. Zwischen den verschiedenen Phasen wurde der Proband gebeten, ein Kreuz, welches in der Mitte der Leinwand erschien, zu fixieren, um die Kalibrierung von Eye- und Headtracker später überprüfen zu können. Dabei sollte der Proband das Kreuz möglichst genau fixieren und sich nicht bewegen.

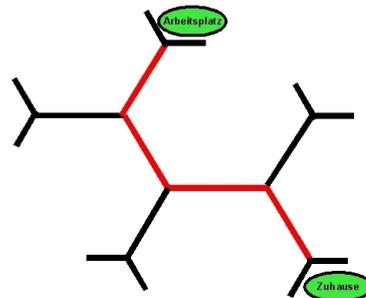


Abbildung 20: Darstellung der Straßen und der beiden Ziele (Zuhause und Arbeitsplatz) in Hexatown. Die rote Linie zeigt den kürzesten Weg und wird als Hauptstraße bezeichnet.

Als Versuchsumgebung diente, wie bereits erwähnt, die in Abbildung 16 dargestellte Stadt. Mithilfe der Pfeiltasten auf der Tastatur konnte der Proband sich in der virtuellen Welt bewegen. Jedoch gab es dabei einige Einschränkungen: Er konnte sich an den Kreuzungen immer nur um  $60^\circ$  drehen. Wenn er geradeaus fahren wollte, startete er die Bewegung durch Tastendruck und

wurde dann zur nächsten Kreuzung gefahren. Außerdem waren nicht alle Straßen passierbar, es gab auch Sackgassen. Wenn ein Proband in eine Sackgasse fuhr, konnte er nicht rückwärts herausfahren, sondern musste sich drehen, um wieder zurückfahren zu können. Einen schematischen Überblick zeigt Abbildung 20. Während des Trainings hatten die Probanden die Aufgabe, eine bestimmte Route (in rot dargestellt) zu lernen.



Abbildung 21: Ziele im Training I: links: Zuhause (gelbes Haus), rechts: Arbeitsplatz (braunes Haus).

Im **Training I** konnte der Proband Hexatown erkunden und sich mit der Stadt vertraut machen. Seine Aufgabe war es dann, den kürzesten Weg zwischen seinem Zuhause und seinem Arbeitsplatz zu finden. Dies konnte er ohne Zeitlimit tun. Die Probanden liefen solange zwischen den zwei Zielen („Zuhause“ und „Arbeitsplatz“) (Abb. 21) hin und her, bis sie in beide Richtungen den kürzesten Weg gefunden hatten. Überflüssige Drehungen auf der Stelle wurden als Fehler bewertet, das heißt, wenn ein Proband rechts abbiegen wollte, sich aber vorher nach links gedreht hatte, dann wurde das als Fehler bewertet.

Wenn das erste Mal ein kürzester Weg, egal ob Hinweg oder Rückweg, gefunden wurde, wurde das Training durch die Orientierungsaufgabe unterbrochen. Die **Orientierungsaufgabe** sollte sicher stellen, dass die Probanden auf beide Typen von Landmarken aufmerksam wurden. Die Probanden befanden sich an einer bekannten Kreuzung und ihre Aufgabe war es nun, sich so zu drehen, dass sie in die Richtung einer unten rechts eingeblendeten Landmarke (jeweils eine von drei globalen oder eine von zwei lokalen Landmarken) blickten (Abb. 22). Sie konnten sich frei drehen, indem sie die



Abbildung 22: Ein Beispiel aus der Orientierungsaufgabe. Der Proband steht an einer Kreuzung und kann sich dort drehen. Rechts unten wird das Ziel eingeblendet.

Pfeiltasten der Tastatur verwendeten, das heißt, nicht nur um  $60^\circ$  wie in Training I. Nachdem sie sich in die gewünschte Richtung gedreht hatten, drückten sie die Leertaste. Die globalen Landmarken wurden für diese Aufgabe entfernt.

Nach der Orientierungsaufgabe wurde die Route zwischen „Zuhause“ und „Arbeitsplatz“ solange wiederholt, bis in beide Richtungen der kürzeste Weg gefunden wurde. Der Proband erhielt nach dem Erreichen des jeweiligen Ziels ein Feedback, ob dies der kürzeste Weg war, oder nicht (Abb. 23).



Abbildung 23: Die Schilder im Training I zeigen an, ob der kürzeste Weg gefunden wurde oder nicht.

Das **Training II** war der nachfolgenden Testphase ähnlich. Diese zweite Trainingsphase hatte zum Ziel, dass die Route nicht nur als Sequenz von Bewegungsentscheidungen gelernt wurde (z.B. links, rechts, rechts), sondern an jeder Kreuzung eine Bewegungsentscheidung mit entweder einer lokalen („fahre am Turm rechts“) oder einer globalen („fahre auf die Frankfurter Skyline zu“) Landmarke assoziiert wurde. Der Proband wurde dafür an einer der drei Kreuzungen, die auf der trainierten Route lagen, positioniert und konnte sich dort umschauen, jedoch nicht drehen. Er blieb solange an der Kreuzung stehen bis er die Leertaste drückte und damit den Anstoß gab, zu einer benachbarten Kreuzung gefahren zu werden. Von dieser Kreuzung aus sollte der Proband den Weg zum Ziel („Zuhause“ oder „Arbeitsplatz“), welches wieder rechts unten eingeblendet wurde, fortsetzen.

In diesem Training gab es 12 Durchgänge (Abb. 24). Die 12 Durchgänge mussten an 3 Kreuzungen x 2 Anfahrtsrichtungen x 2 Ziele getroffen werden. Ein Durchgang bestand aus:

1. Stehen an der Startkreuzung
2. Transport zur Zielkreuzung
3. Umschauen an der Zielkreuzung, bis die Entscheidung getroffen wurde, ob man links oder rechts weitergehen muss, um das eingeblendete Ziel zu erreichen.

Das Wort „Entscheidung“ bezieht sich in diesem Fall nur auf das Drücken der rechten oder linken Pfeiltaste. Die Kreuzungen, an denen eine Entscheidung getroffen werden musste und die verschiedenen Anfahrtswege sind in Abbildung 24 schematisch dargestellt. Die hellblauen Pfeile zeigen die Durchgänge in Richtung Zuhause und die dunkelblauen Pfeile die Durchgänge in

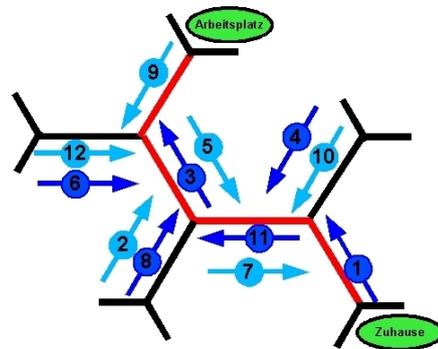


Abbildung 24: Die Abbildung zeigt die verschiedenen Durchgänge im Training II. Die hellblauen Pfeile zeigen die Durchgänge in Richtung Zuhause und die dunkelblauen Pfeile die Durchgänge in Richtung Arbeitsplatz. Die rote Markierung stellt die trainierte Route, Hauptstraße, dar.

Richtung Arbeitsplatz. Die rote Markierung präsentiert die trainierte Route, Hauptstraße. Die verschiedenen Durchgänge starteten nicht alle auf der trainierten Route (rote Linie in Abb. 20), sondern konnten auch von Seitenstraßen (Durchgang 2, 4, 6, 8, 10 und 12) anfangen. Abbildung 25 zeigt ein Foto von Hexatown, in welchem die verschiedenen Kreuzungen eingezeichnet sind. Kreuzung A ist rot markiert, Kreuzung B gelb und Kreuzung C blau.

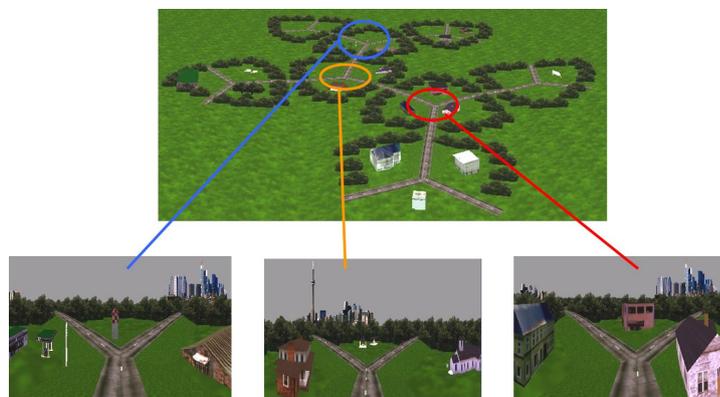


Abbildung 25: Oben: Hexatown. In rot (Kreuzung A), gelb (Kreuzung B) und blau (Kreuzung C) sind die Kreuzungen markiert, an welchen die Probanden in Training II und im Test die Entscheidungsaufgaben lösen mussten. Unten: Blick auf die 3 Kreuzungen, jeweils in Laufrichtung zum Arbeitsplatz.

Auch in dieser Phase erhielt der Proband nach jedem Durchgang eine Rückmeldung (Abb. 26), ob die Entscheidung richtig oder falsch war. Danach folgte noch einmal die Orientierungsaufgabe. Dann wurden die Durchgänge noch einmal wiederholt, bei denen der Proband eine falsche Entscheidung

getroffen hatte. Das Training endete, wenn alle Durchgänge richtig beantwortet wurden.

**RICHTIG :-)**      **FALSCH :-)**

Abbildung 26: Die Schilder im Training II geben eine Rückmeldung, ob die Entscheidung richtig oder falsch war.

Die abschließende **Testphase** war in zwei Teile unterteilt, Kontroll- und Konfliktphase. Die Kontrollphase entsprach dem Paradigma aus Training II, es wurde jedoch kein Feedback gegeben. Es wurde überprüft wie gut die Probanden die Aufgabe im Training II gelernt hatten.

Im zweiten Teil, der Konfliktphase, gab es ebenfalls 12 Entscheidungen, jedoch wurde ein Informationskonflikt durch Drehen der drei globalen Landmarken um den Mittelpunkt von Hexatown eingeführt. Eine im Training II zu sehende globale Landmarke wurde im Konflikt auf die gegenüberliegende Seite positioniert (Abb. 27). Da die globalen Landmarken jedoch aneinander gekoppelt sind, konnte es passieren, dass im Konfliktfall eine globale Landmarke an einer Kreuzung auftauchte, welche vorher nicht zu sehen war (Abb. 27 unten). Hatten sich die Probanden an einer Kreuzung die globale Landmarke gemerkt, so trafen sie hier eine andere Bewegungsentscheidung, als wenn sie sich die lokale Landmarke gemerkt hatten. Eine Entscheidung im Sinne der lokalen Landmarke war also genau entgegengesetzt zu einer Entscheidung im Sinne der globalen Landmarke, was auch in Abbildung 27 verdeutlicht wird. Durch das Drehen sollte herausgefunden werden, welchen Typ von Landmarke, lokal oder global, der Proband an einer bestimmten Kreuzung für die Lösung der Navigationaufgabe benutzt hatte.

Nach dem Experiment wurde der Proband gebeten, einen Fragebogen (siehe Anhang B) auszufüllen, in dem verschiedene Strategien abgefragt wurden.

Danach wurde, an einem PC, noch ein PTA (Perspective Taking Ability)-Test (Kozhevnikov & Hegary, 2004) durchgeführt. Dem Probanden wird ein zweidimensionales Feld mit Objekten gezeigt (Abb. 28) und er wird gebeten, in diesem Feld eine bestimmte Perspektive einzunehmen, um dann von dieser Perspektive aus in Richtung eines Zielobjektes zu zeigen. Dieser Test besteht aus 58 Durchgängen und dauert ca. 10 Minuten. Am Ende wird eine Punktzahl ausgegeben, welche sich aus der Genauigkeit und Schnelligkeit errechnet. Diese Punktzahl zeigt, wie gut die räumliche Orientierung und das Navigationsverhalten des Probanden ist.



Abbildung 27: In der Konfliktphase werden die globalen Landmarken vertauscht, um herauszufinden, welcher Typ von Landmarke der Proband bevorzugte. Die globalen Landmarken wurden mit dem Uhrzeigersinn gedreht (oben) oder gegen den Uhrzeigersinn (unten).

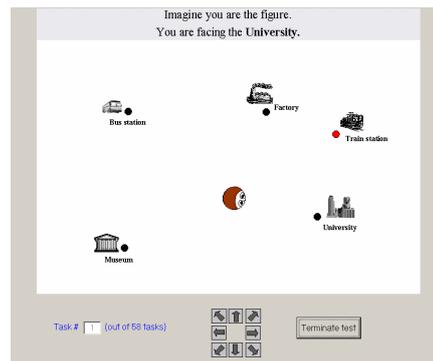


Abbildung 28: Ausschnitt aus dem PTA-Test

### 2.2.3 Programmbeschreibung

Das Programm, welches für das Navigationsexperiment verwendet wurde und somit Grundlage dieser Arbeit war, stand als Vorversion zur Verfügung, jedoch mussten einige Änderungen vorgenommen werden. Das Programm wurde in C geschrieben und setzt sich aus verschiedenen Komponenten (Abb. 29) zusammen.

Als Grafik-Bibliothek wurde der SGI OpenGL Performer verwendet, welcher die Möglichkeit bietet, eine große Anzahl von Datenformaten für die 3D-Szenen einzulesen.

Nachdem die Szene eingelesen wurde, erfolgte eine von S. Gillner und H. Dahmen entwickelte Bildverzerrungsroutine. Aufgrund der kegelförmig ge-

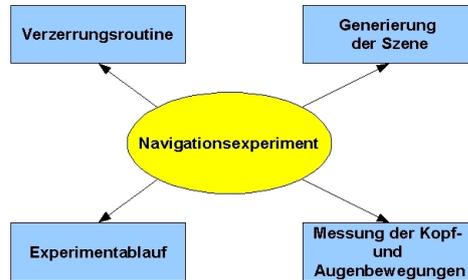


Abbildung 29: Das Hauptprogramm zur Durchführung des Experimentes besteht aus verschiedenen Teilbereichen, die in den blauen Kästen dargestellt sind.

schnittenen Projektionsleinwand, konnte die auf dem Bildschirm des Computers dargestellte Szene nicht einfach auf die Leinwand projiziert werden. Eine Bildverzerrungsroutine war notwendig, um die von der kegelschnittförmigen Leinwand herbeigeführte Verzerrung des Bildes zu kompensieren. Die Idee hierbei ist, dass eine bestimmte Anzahl virtueller Kamerabilder der 3D-Landschaft, die im Backbuffer der OpenGL-Pipeline abgelegt werden, aufnimmt und berechnet. Danach werden diese Bilder als Textur ausgelesen und über Winkelberechnungen so verzerrt, dass der vor der Leinwand sitzende Proband diese unverzerrt wahrnehmen kann.

Weitere wichtige Funktionen dienten zur Aufnahme der Eye- und Headtrackerdaten und dem Schreiben in eine Datei. Die Verzerrungsroutine und die Messung der Kopf- und Augenbewegungen konnten ohne Veränderung übernommen werden.

Bei der Generierung der Szene und dem Experimentablauf wurden folgende Modifikationen vorgenommen:

**Austausch der globalen Landmarken:** Dazu mussten Bilder von Skylines gesucht werden, mit Photoshop in transparente Bilder umgewandelt und dann in Multigen auf eine Textur gesetzt und in die Szene eingebunden werden. Dabei war zu beachten, dass die Skylines nicht alle durch ein zusammenhängendes Objekt mit drei verschiedenen Texturen für die Skyline von Frankfurt, Toronto und Sydney dargestellt wurden, sondern als getrennte Objekte. Ansonsten hätten sie in der automatischen Auswertung nur eine Objektnummer gehabt und sich somit nicht unterschieden bzw. nicht getrennt angesprochen werden können.

**Veränderungen im Experimentablauf:** Das Experiment wurde in der Hinsicht geändert, dass die Orientierungsaufgabe nur während Training I und Training II durchgeführt wurde und nicht zwischen Training I und Training II und zwischen Training II und Testen. Zusätzlich wurde dem Probanden die Möglichkeit gegeben, sich in der Orientierungsaufgabe frei zu drehen, also nach links und rechts, während bei S. Steck die Richtung am Anfang der Aufgabe festgelegt wurde.

**Ergänzen von Schildern:** Im Training II wurden Schilder ergänzt, die eine Rückmeldung gaben, ob die Bewegungsentscheidung an der jeweiligen Kreuzung richtig oder falsch war. Um dies zu realisieren, wurde eine neue Funktion in das Programm eingeführt, die für jeden einzelnen Durchgang das erwartete Ergebnis mit dem tatsächlichen verglich und dann eine Rückmeldung über Schilder auf der Leinwand erscheinen ließ.

**Veränderungen in Training II:** Außerdem wurde dieses Training so verändert, dass es erst endete, wenn alle Bewegungsentscheidungen richtig waren, damit man davon ausgehen konnte, dass die Probanden gelernt und nicht nur geraten hatten. Eine weitere Änderung war, dass nun 12 Durchgänge anstatt acht getestet wurden.

**Veränderungen in der Konfliktphase:** In der Konfliktbedingung wurde ein Informationskonflikt durch Drehen der drei globalen Landmarken eingeführt. Die Landmarken sollten entweder im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn um  $120^\circ$  um den Mittelpunkt von Hexatown, in der Mitte der Straße von Kreuzung A und B, gedreht werden, so dass es eindeutige Entscheidungen im Sinne der lokalen oder globalen Landmarken gab. Jedoch konnte der gewünschte Effekt nicht erreicht werden, da die globalen Landmarken in der Szene nicht symmetrisch angeordnet waren. Somit musste bei jedem einzelnen Durchgang die globale Landmarkenkonfiguration angepasst werden, indem man für jeden Durchgang der betroffenen Landmarke neue Koordinaten zuwies.

**Ergänzen von Indizes:** Um die spätere Auswertung zu erleichtern, wurden noch neue Indizes eingeführt, um zu wissen, in welcher Phase (Training I, Training II, Orientierungsphase, Testen) sich der Proband befand, welche Richtung (links, rechts, geradeaus) er einschlug, wie er sich in Training II und Testen entschied und ob die Entscheidung richtig war. Diese Daten wurden zusammen mit den Eye- und Headtrackerdaten in eine Datei geschrieben.

## 2.3 Datenanalyse

Eine Übersicht über die Auswertung zeigt Abbildung 30.

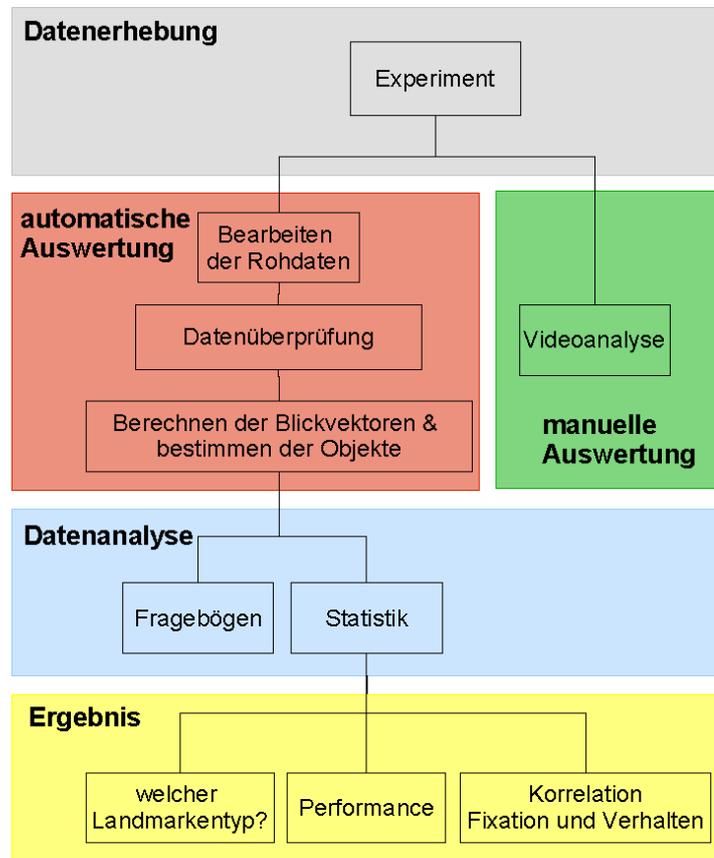


Abbildung 30: Schematische Übersicht der Auswertung. In grün ist die manuelle Auswertung, in rot die automatische Auswertung, in blau die Datenanalyse und in gelb ist der Ergebnisteil dargestellt.

Da ein Ziel dieser Arbeit die Evaluation einer automatischen Auswertung war, wurden die Daten sowohl manuell als auch automatisch ausgewertet. Die manuelle Auswertung war eine Videoanalyse und wird unter Punkt 2.3.2 näher erläutert. Bei der automatischen Auswertung mussten zuerst die Rohdaten zerlegt, überprüft und fehlerhafte Dateien angepasst oder ausgefiltert werden, bevor die Daten analysiert werden konnten. Weiterhin wurden die Fragebögen ausgewertet. In der Analyse sollten folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie gut hat der Proband gelernt?
- Welchen Landmarkentyp bevorzugt er?
- Gibt es eine Korrelation von Verhalten und Augenbewegung?

### 2.3.1 Automatische Auswertung

Ziel der automatischen Auswertung war zunächst die Bestimmung der fixierten Objekte. Aufbauend auf der Studienarbeit von S. Mayer (2006) wurde mit Eye- und Headtrackerdaten der korrekte Blickvektor des Probanden bestimmt. In Abbildung 31 werden die alpha- und epsilon-Werte dargestellt. Das obere Bild zeigt die Augenbewegungskomponente in horizontaler Richtung und das untere Bild die Augenbewegungskomponente in vertikaler Richtung.

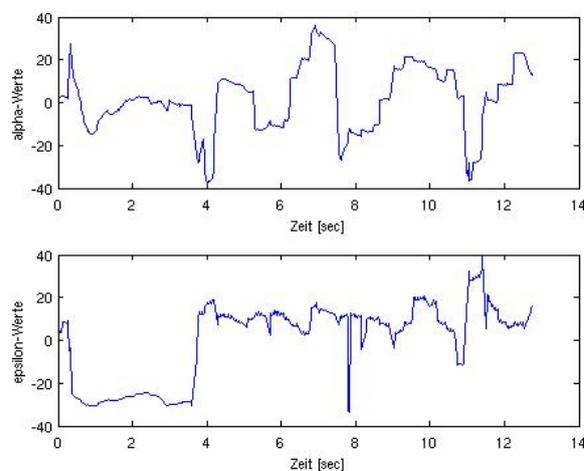


Abbildung 31: Zeichnet man die alpha- und epsilon-Werte auf, kann man die Augenbewegungen der Probanden verfolgen. Dabei stellen die alpha-Werte (oben) die Augenbewegungskomponente in horizontaler Richtung und die epsilon-Werte (unten) in vertikaler Richtung dar.

In einer zweiten Studienarbeit (Rothländer, 2006) konnte mit diesem Blickvektor und den dazugehörigen x-, y-, z- Koordinaten des Probanden das fixierte Objekt bestimmt werden (Abb. 32).

Das Ergebnis dieser beiden Studienarbeiten wurde von mir auf mein Experiment angepasst und evaluiert. Im einzelnen traten dabei folgende Probleme auf:

**Messwerte sind außerhalb der Leinwand:** Im Fall einer extremen Augenbewegung des Probanden, konnte es vorkommen, dass anstelle des Cornea Reflexes ein undefinierter Lichtreflex auf dem Augapfel vermessen wurde. So können Messwerte entstehen, die nicht auf der Leinwand liegen, folglich der Azimuth kleiner als  $-75^\circ$  oder größer als  $75^\circ$  und die Elevation kleiner als  $-23^\circ$  oder größer  $45^\circ$  ist. Das Analyseprogramm konnte diese Werte nicht auswerten und brach an den betreffenden Stellen ab. Die Behebung des Feh-

lers hatte einen Datenverlust zur Folge, da die betreffenden Zeilen aus dem Datenfile gelöscht werden mussten.

**Es wird kein Objekt gefunden:** Im Analyseprogramm von C. Rothländer wird errechnet, welcher Sehstrahl auf welches Objekt trifft. Da zur einfacheren Verarbeitung alle Objekte durchnummeriert sind (Abb. 17), erhalten wir als Ergebnis eine Auflistung aller betrachteten Objekte in Form einer Nummernfolge. Wurde keine Objekt Nummer für ein Objekt gefunden, weil z.B. der Himmel angesehen wurde, entstand in der Ausgabedatei eine Lücke, was in der späteren Auswertung unter Matlab zu Problemen führte. Aus diesem Grund wurde dieser Fall mit einer Schleife abgefangen und eine spezielle Nummer, die noch nicht verwendet wurde, zugewiesen.

**Sehstrahl trifft auf „transparente“ Objekte:** Um zu verhindern, dass der Proband vom aktuellen Standpunkt aus auch die lokalen Landmarken an der benachbarten Kreuzung sehen kann, wurden als Sichtschutz Büsche um die Kreuzungen herum arrangiert (Abb. 16). Diese Büsche sind flache 2-D Gebilde, die sich kontinuierlich mit der Front zum jeweiligen Standpunkt des Probanden ausrichten. Durch diese spezielle Drehfunktion waren diese Büsche für das „Sehstrahl-Analyse-Programm“ (Rohländer, 2006) durchsichtig. Somit trat das Problem auf, dass der Sehstrahl durch dieses Objekt hindurch ging und Objekte getroffen wurden, die für den Probanden gar nicht sichtbar waren. Da man diese Objekte nicht einfach in undurchsichtige Objekte umwandeln konnte, wurden, ausschließlich für die Analyse, über die betreffenden Objekte mithilfe von Multigen neue Objekte gelegt, die den Umrissen des ursprünglichen Objektes entsprachen.

### 2.3.2 Manuelle Auswertung

Bei der manuellen Auswertung wurde der Film ausgewertet, der von dem Mini-Video-Recorder während des Experiments aufgezeichnet worden war. Es handelte sich dabei um die Bilder der Szenenkamera mit dem Fadenkreuz (Abb. 15 mittlerer Monitor). Zuerst musste der aufgenommene Film von der Videokassette mithilfe der Adobe Premier Software auf einen Rechner überspielt und gespeichert werden. Danach wurde der Film so geschnitten, dass dieser in die verschiedenen Phasen und Durchgänge getrennt war, wie es vor der automatischen Auswertung anhand der Indizes auch gemacht wurde. Dabei war es wichtig, dass man möglichst genau schnitt, damit die Abschnitte später den Abschnitten der Rohdaten zugeordnet werden konnten. Nachdem die verschiedenen Filmabschnitte gespeichert waren, wurden sie mit Virtualdub in Halbbilder zerlegt und als .avi abgespeichert.

Nach dieser Vorarbeit begann die eigentliche Auswertung mit einem Matlabfile. Dieses Matlabfile sorgte dafür, dass der Filmausschnitt geladen und Halbbild für Halbbild bearbeitet werden konnte. Dabei wurde jeweils die

Nummer des Objekts eingetippt, auf welchem das Fadenkreuz lag. Dabei sollte jedes Objekt eine andere Nummer haben, damit später in der Auswertung die Möglichkeit bestand, sie einzeln zu analysieren.

Wegen des begrenzten Bildausschnitts der Szenenkamera kam es bei dieser Auswertungsart im Vergleich zur automatischen Auswertung zu einer erhöhten Anzahl von Messausfällen. Die meisten der globalen Landmarken, die Skylines, waren nicht sichtbar und somit konnte man nicht feststellen, ob diese fixiert wurden oder nicht. Diese Ausfälle hätten durch mehr Kopfbewegungen der Probanden vermindert werden können. Ein weiteres Problem bei der Videoauswertung war, dass man nicht immer genau erkennen konnte, auf welchem Objekt das Fadenkreuz lag. Dies war oft an den Kanten eines Objekts der Fall. Welches Objekt dann gewertet wurde, lag im Ermessen des Auswertenden.

Auf Grund dieser Probleme wurde die manuelle Auswertung in dieser Arbeit nicht weiter verwendet und ausschließlich die automatische benutzt. Der Vergleich von manueller und automatischer Auswertung wird in einer weiteren aktuellen Diplomarbeit am Lehrstuhl für kognitive Neurowissenschaft von W. Röhrich (2007) untersucht.

### 2.3.3 Analyse der Daten

Die folgenden Analysemethoden, also die Fixationsberechnung und Statistik, wurden mit Matlab programmiert. Matlab (Version R2006b) ist eine plattformunabhängige Software der Firma The MathWorks zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse.

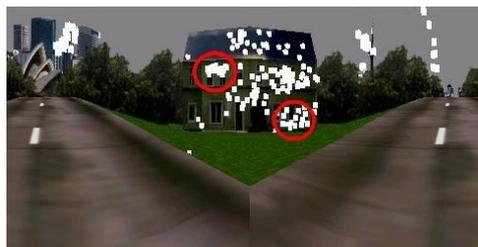


Abbildung 32: Die Abbildung zeigt die verschiedenen Sehstrahlen auf ein Objekt. Bei der ersten Methode könnten beide roten Kreise zu einer Fixation gehören, in Methode zwei wären es zwei Fixationen.

Das Kernstück dieser Auswertung war das Herausfiltern echter Fixationen. Während einer Fixation richten die Augen den Blick auf ein bestimmtes Objekt, um wichtige Informationen zu sammeln.

Um von einer Fixation reden zu können, mussten bestimmte Kriterien erfüllt werden. Fixationen können durch den zeitlichen und räumlichen Abstand berechnet werden. Dabei müssen bestimmte Schwellenwerte erreicht

werden. Für den zeitlichen Abstand wurden 100 msec und für den räumlichen Abstand  $2^\circ$ , die 5.66 cm auf der Leinwand entsprachen, festgelegt. Die Schwellenwerte hatten wir in der Literatur (Rötting, 2000) gefunden und mithilfe von Histogrammen überprüft und bestätigt. In unserem Fall wurden drei Methoden implementiert. Zum einen wurden Blickvektoren für die Auswertung verwendet und zum anderen Fixationen.

Bei der ersten Methode wurden die Objekte, die durch die Blickvektoren getroffen wurden als „fixierte Objekte“ bezeichnet, obwohl man bei Betrachtungen noch nicht von Fixationen sprechen kann, da es sich nur um Blickvektoren handelt und die Kriterien für eine Fixation nicht erfüllt sind.

Bei einer zweiten Methode sollten die Fixationen nach der oben genannten Bedingung berücksichtigt werden. Hierbei sollte über die Aufzeichnungsrate, folglich über die Zeilen in der Ausgabedatei, die zeitliche Komponente berechnet werden. Das bedeutet, dass fünf Zeilen dem Fixationskriterium für die Zeit entsprochen hätten. Jedoch stellte sich heraus, dass die Daten nicht gleichmäßig mit 60 Hz geschrieben waren und somit der zeitliche Abstand zwischen zwei Zeilen nicht immer 20 msec betrug. Wegen dieser Unregelmäßigkeiten konnte das zeitliche Fixationskriterium schon nach weniger als fünf Zeilen erfüllt sein. Deshalb wurden die Zeilen vernachlässigt und eine parallel verlaufende Zeitspalte für die zeitliche Analyse ergänzt. Wenn ein Objekt für mindestens 100 ms angeschaut wurde, dann war es eine Fixation.

Da die zweite Methode der Fixationsberechnung zu ungenau war und nicht zwischen verschiedenen Fixationen auf ein Objekt unterschied, wurde eine dritte Methode implementiert, die in Abbildung 33 dargestellt ist. Diese Methode berücksichtigte neben der Zeit auch den räumlichen Abstand zwischen Blickvektoren. Zuerst wurden die Daten zusammengefasst, deren Blickvektoren räumlich innerhalb des Schwellenwertes von  $2^\circ$  lagen und dann wurde überprüft, ob das zeitliche Kriterium von 100 msec erfüllt war. Der Algorithmus summierte somit die Zeit solange auf, bis der Abstand zwischen zwei Blickvektoren größer als  $2^\circ$  war und überprüfte dann, ob die Summe über 100 ms lag. War dies der Fall, waren beide Kriterien erfüllt und es handelte sich um eine Fixation. Zu dieser Fixation gehörten verschiedene Blickvektoren, die nicht immer auf das gleiche Objekt zeigten und somit wurde ermittelt, welches Objekt am häufigsten angeschaut wurde. Dieses Objekt wurde dann in eine Fixationsliste übernommen, die für die weiteren Statistiken benötigt wurde.

Vorteil dieser dritten Methode war, dass auch Fixationen auf das gleiche Objekt unterschieden werden können. Abbildung 32 stellt einen solchen Fall dar. Wurde die zweite Methode verwendet, würde man nur von einer Fixation reden, da jedoch bei der dritten Methode auch der Abstand relevant war, konnte diese Fixation in zwei Fixationen auf ein Objekt unterteilt werden.

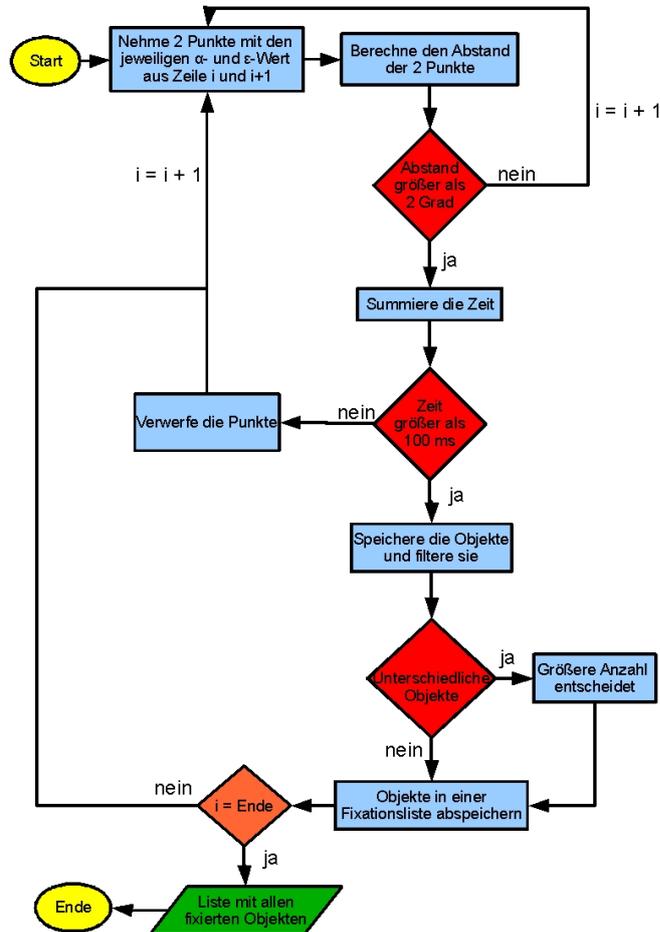


Abbildung 33: Berechnung der Fixation anhand von Abstand und Zeit: Die roten Rauten stellen die Bedingungen und die blauen Rechtecke die Anweisungen dar.

Ein weiter Vorteil war, dass Fixationen, die am Rand eines Objektes lagen, noch zu dem Objekt gezählt werden konnten, auch wenn nicht alle Blickvektoren genau das Objekt trafen. Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit die dritte Methode angewandt.

Nach der Berechnung der Fixationen wurden einige Statistiken auf die erhaltenen Messdaten angewandt. Zur besseren Übersicht wurden die verschiedenen Analysen in Funktionen getrennt. Die wichtigste Funktion, die Berechnung der Fixation, wurde bereits erwähnt. Daneben gibt es Funktionen zur Bewertung und Korrelation, ob „letzte“, „vorletzte“, „längste“ oder „häufigste“ Fixation und Bewegungsentscheidung zusammenhängen, zur Berechnung des Landmarkentyps des Probanden, Aufteilung der Ergebnisse nach Richtung

(Zuhause, Arbeitsplatz) oder Kreuzungen.

Für die Statistik sind die bereits erwähnten Indizes in der Eingabedatei besonders wichtig, da man so die Daten filtern kann. Außerdem wäre eine Aufteilung der Bewegungsentscheidung nach Kreuzung und Richtungen ohne sie unmöglich.

Die interessanteste Auswertung für diese Arbeit ist der Zusammenhang von Fixation und Entscheidung. Eine gute Korrelation zwischen „letzter“, „vorletzter“, „häufigster“ oder „längster“ Fixation und Bewegungsentscheidung kann erreicht werden, wenn der Proband eine lokale bzw. globale Landmarke fixiert und sich dann auch im Sinne dieser lokalen bzw. globalen Landmarke entscheidet. Fixationen auf andere Objekte der Umgebung, wie Straßen, Büsche oder Himmel, werden in der Rubrik „Sonstiges“ zusammen gefasst. Die „sonstigen Objekte“ werden bei der Klassifizierung von Fixationen nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der Korrelation wurden die Fixationen auf lokale Landmarken mit einer 1 und die Fixationen auf globalen Landmarken mit einer -1 gewertet. Ebenso bekamen Bewegungsentscheidungen im Sinne der lokalen Landmarke eine 1 und Bewegungsentscheidungen im Sinne der globalen Landmarke eine -1. Dabei gab es zwei Sonderfälle: Wenn die Anzahl oder Dauer der lokalen und globalen Fixationen gleich war und keine eindeutige Zuordnung möglich war, wurde eine 0 vergeben. War keine Fixation vorhanden, wurde ebenso eine 0 zugeordnet.

Die „letzte“ Fixation ist also die letzte Fixation vor der Entscheidung auf eine lokale oder globale Landmarke. Die „vorletzte“ Fixation war dementsprechend die vorletzte Fixation vor der Entscheidung auf eine lokale oder globale Landmarke. Die „häufigste“ Fixation wurde über die Anzahl der Fixationen auf eine lokale oder globale Landmarke bestimmt. Die „längste“ Fixation ergab sich aus der Dauer der Fixationen auf lokale oder globale Landmarken in einem Durchgang.

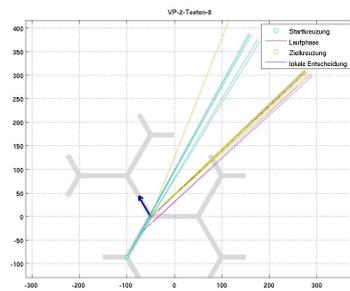
Zusätzlich wurde bei der letzten und vorletzten Fixation überprüft, ob die Fixation auf der rechten oder linken Seite der Leinwand lag und dies dann mit der Richtungsentscheidung im Durchgang verglichen. Der Unterschied zwischen Richtungs- und Bewegungsentscheidung ist, dass bei der Richtungsentscheidung nur das „Links“ oder „Rechts“ Abbiegen von Bedeutung ist und anhand der Bewegungsentscheidungen herausgefunden werden soll, ob sich der Proband im Sinne der lokalen oder globalen Landmarke orientiert hat.

Um neben der Korrelation auch Signifikanzen zu bestimmen, wurde die Anzahl der Übereinstimmungen von den Bewegungsentscheidungen bzw. Richtungsentscheidungen und den Fixationenarten bzw. Fixationen auf eine Leinwandseite ermittelt und mithilfe des Chi-Quadrat-Tests die Signifikanz berechnet.

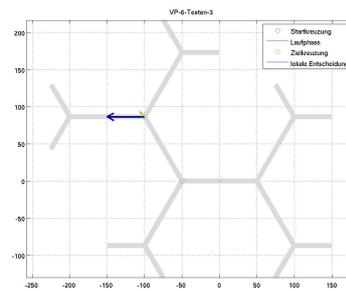
### 3 Ergebnisse

Das Ziel dieser Diplomarbeit war es, den Zusammenhang von Augenbewegungen und Bewegungsentscheidungen zu untersuchen. Um dies zu analysieren wurde ein Navigationsexperiment verwendet, bei welchem die Probanden in einer virtuellen Stadt verschiedene Bewegungsentscheidungen treffen mussten.

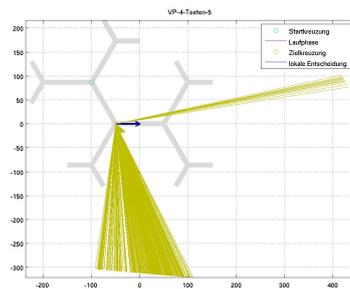
In den Trainingsphasen lernten die Probanden die Umgebung durch Exploration kennen. Hierbei erlernten sie den kürzesten Weg (Hauptstraße) zwischen zwei Zielen („Zuhause“ und „Arbeitsplatz“). In der Testphase wurden die Probanden von der Startkreuzung an die Zielkreuzung transportiert und mussten dort entscheiden, ob sich das eingeblendete Ziel („Arbeitsplatz“ oder „Zuhause“) rechts oder links von ihnen befand. Gemessen wurden dabei die Augenbewegungen sowie die Bewegungsentscheidungen des Probanden. Als Entscheidung wird der Entschluss bezeichnet, in die linke oder rechte Straße abzubiegen.



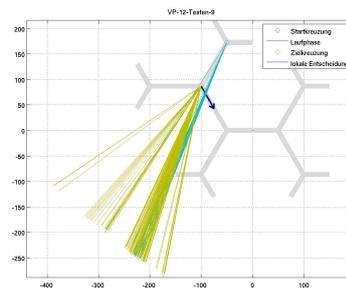
(a) Sehstrahlen (Proband-ID: 2, Durchgang: 8, Entscheidung: lokal)



(b) Sehstrahlen (Proband-ID: 6, Durchgang: 3, Entscheidung: lokal)



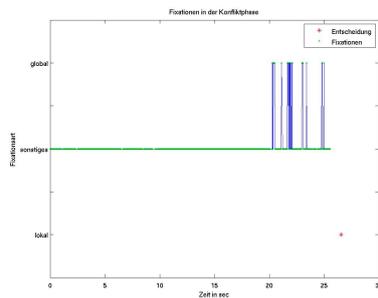
(c) Sehstrahlen (Proband-ID: 4, Durchgang: 5, Entscheidung: lokal)



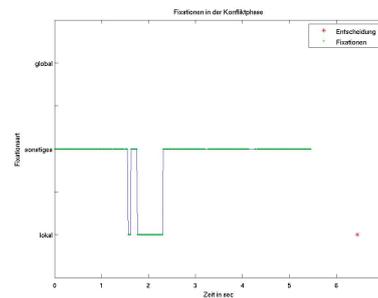
(d) Sehstrahlen (Proband-ID: 12, Durchgang: 9, Entscheidung: lokal)

Abbildung 34: Sehstrahlen an der Startkreuzung, Laufphase und Zielkreuzung. Der Pfeil zeigt die Art der Entscheidung an (blau = lokale Entscheidung, rot = globale Entscheidung).

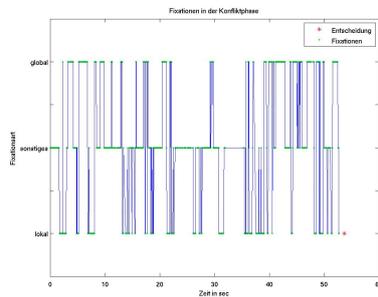
Abbildungen 34 a – d zeigen die Blickvektoren an der Startkreuzung (blau), während der Laufphase (lila) und an der Zielkreuzung (gelb) von vier willkürlichen Durchgängen. Der Pfeil gibt Auskunft darüber, ob es sich um eine lokale (blauer Pfeil) oder globale Bewegungsentscheidung (roter Pfeil) handelt. Anhand der Strahlenlänge kann festgestellt werden, ob es sich um eine lokale oder globale Fixation handelt. Ist der Sehstrahl kurz (Abb. 35a) wurde eine lokale Landmarke betrachtet. Ist der Sehstrahl lang (35c) wurden globale Landmarken angesehen.



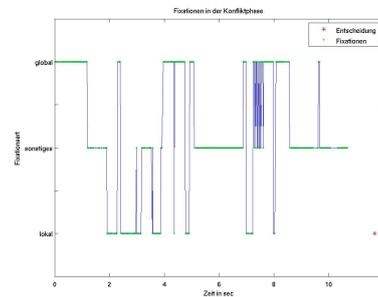
(a) Zeitliche Abfolge der Fixationen (grün) (Proband-ID: 2, Durchgang: 8, Entscheidung: lokal (\*))



(b) Zeitliche Abfolge der Fixationen (grün) (Proband-ID: 6, Durchgang: 3, Entscheidung: lokal (\*))



(c) Zeitliche Abfolge der Fixationen (grün) (Proband-ID: 4, Durchgang: 5, Entscheidung: lokal (\*))



(d) Zeitliche Abfolge der Fixationen (grün) (Proband-ID: 12, Durchgang: 9, Entscheidung: lokal (\*))

Abbildung 35: Zeitliche Abfolge der Fixationen während eines Durchgangs

Abbildungen 35 a–d zeigen die zeitliche Abfolge der Fixationen für die vier Durchgänge, die bereits in Abbildung 34 dargestellt wurden. Die Fixationen werden dabei auf drei Objektgruppen (lokal, global, sonstiges) aufgeteilt. Das Sternchen im Schaubild zeigt an, ob die Bewegungsentscheidung lokal oder global war. In Abbildung 35 a entschied sich der Proband lokal, obwohl die vorletzte, letzte, längste sowie häufigste Fixation global ist. Abbildung 35 b zeigt das gegenteilige Verhalten. Die Entscheidung ist lokal und auch die Fixationsarten stimmen mit der Bewegungsentscheidung überein. So ein-

deutiges Verhalten wie in Abbildung 35 a und b gibt es jedoch nur selten, oft hängen die vorletzte oder letzte nicht mit der längsten oder häufigsten zusammen. In Abbildung 35 c entscheidet sich der Proband im Sinne der lokalen Landmarke, was auch durch die letzte, längste und häufigste Fixation unterstrichen wird. Die vorletzte Fixation hingegen ist global. Abbildung 35 d ist deshalb interessant, da die letzte und vorletzte Fixation global sind, die Entscheidung und längste Fixation hingegen lokal sind. Die lokalen Landmarken werden genauso häufig fixiert wie die globalen. Diese Beispiele sind repräsentativ für die vielen Kombinationsmöglichkeiten von Fixation und Bewegungsentscheidung während der Auswertung.

Die Testphase teilte sich in Kontroll- und Konfliktphase, wobei die Kontroll- sowie die Konfliktphase aus jeweils 12 Durchgängen bestand (Abb. 24). In der Kontrollphase wurde überprüft, ob der Proband im Training die Wege gelernt hatte. In der Konfliktphase wurde durch Drehen der globalen Landmarken ein Informationskonflikt erzeugt, woraus wir erschließen konnten, ob ein Proband lokale oder globale Landmarken zur Wegfindung verwendet hatte.

Bei der Auswertung wurden in Training II und auch in der Testphase nur die Fixationen an der Entscheidungskreuzung, also der Kreuzung, an welcher die Bewegungsentscheidung getroffen wurde, ausgewertet. Dies hatten wir so festgelegt, da zum einen die Probanden an der ersten Kreuzung die relevanten Landmarken noch nicht sehen konnten und zum anderen die Landmarken, die während der Fahrt angeschaut wurden, nicht mitausgewertet werden sollten.

Die Ergebnisse beziehen sich auf 14 der 17 Probanden, da bei einem Probanden die Messwerte nicht aufgezeichnet wurden und die anderen beiden den Informationskonflikt bemerkt hatten. Das Bemerkten des Informationskonflikts führte deshalb zum Ausschluss, da die Probanden dadurch verwirrt waren und somit das Ergebnis verfälscht worden wäre.

Der Ergebnisteil untergliedert sich in folgende Abschnitte:

- Analyse der Bewegungsentscheidungen (Kontroll- und Konfliktphase)
- Analyse des Verhaltens in Trainings- und Orientierungsphase
- Analyse der Augenbewegungen (Trainings- und Testphasen)
- Zusammenhang von Augenbewegungen und Bewegungsentscheidungen
- Auswertung des Fragebogens
- Auswertung des PTA-Tests

Zur besseren Übersicht sind in allen Abbildungen die Anzahl der lokalen Entscheidungen oder lokalen Fixationen in blau dargestellt. Die Anzahl der globalen Entscheidungen und globalen Fixationen sind hingegen in rot eingefärbt.

### 3.1 Bewegungsentscheidungen

In dieser Diplomarbeit sollte unter anderem das Ergebnis von S. Steck (2000) nachgewiesen werden, dass beide Landmarkentypen gleich häufig bei einer Bewegungsentscheidung genutzt werden. Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit bestätigen diese Aussage und werden im Folgenden näher erläutert.

**Kontrollphase:** In der Kontrollphase wurden die Probanden, wie in Training II auch, von einer ersten Kreuzung zu einer zweiten Kreuzung gefahren. An dieser zweiten Kreuzung sollten sie nun entscheiden, ob sie nach rechts oder links abbiegen mussten, um zum eingeblendeten Ziel („Zuhause“ oder „Arbeitsplatz“) zu gelangen. Abb. 33 oben zeigt, dass sich die Probanden zu über 80% richtig entschieden haben. Dieser Wert liegt deutlich über dem Rateniveau von 50%. Untersucht man die Ergebnisse getrennt voneinander, z.B. für jede der drei Kreuzungen, so bemerkt man, dass falsche Entscheidungen an allen drei Kreuzungen gleich häufig gefällt werden (Abb. 66(b), Appendix). Auch bei einer Trennung nach den Laufrichtungen, zum Arbeitsplatz bzw. nach Hause, konnte keine Fehlerhäufung in eine Richtung festgestellt werden.

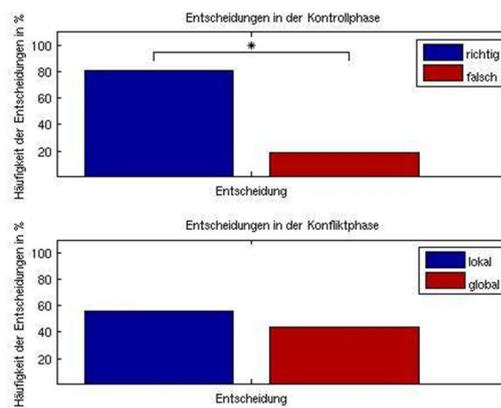


Abbildung 36: Entscheidungen in der Kontroll- und Konfliktphase. Oben ist das Verhalten der Probanden in der Kontrollphase dargestellt, wobei der blaue Balken die Anzahl der richtigen Entscheidungen angibt und der rote Balken die falschen Antworten ( $N = 168$ ). Unten sind die Entscheidungen in der Konfliktphase nach lokal und global getrennt ( $N = 168$ ).

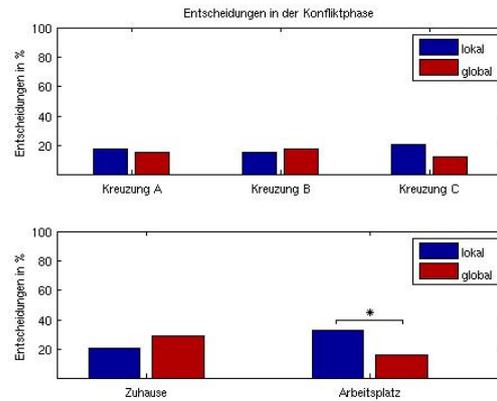


Abbildung 37: Entscheidungen in der Konfliktphase nach Kreuzung ( $N = 56$  pro Kreuzung)(oben) und Laufrichtung ( $N = 84$  pro Laufrichtung)(unten) aufgeteilt. Auch hier werden die lokalen Entscheidungen blau und die globalen Entscheidungen rot dargestellt.

**Konfliktphase:** In der Konfliktphase wurde gemessen, welcher Typ von Landmarke für die Orientierung bevorzugt wurde. Die Anzahl der Entscheidungen auf die wahrgenommenen lokalen bzw. globalen Landmarken waren statistisch gesehen ohne Unterschied ( $\chi_1^2 = 2,0069$ ,  $p > 0,10$ , Abb. 36). Betrachtet man das Ergebnis für die drei Kreuzungen separat (Abb. 37 oben), stellt sich heraus, dass die Probanden an Kreuzung C lokale Landmarken präferieren. Statistisch konnte dies aber nicht bestätigt werden ( $\chi_1^2 = 3,0179$ ,  $p > 0,5$ ). Betrachtet man die Durchgänge mit unterschiedlichen Laufrichtungen separat, lässt sich bei den Durchgängen in Richtung Zuhause kein Unterschied zwischen der Anzahl der Entscheidungen im Sinne der lokalen und globalen Landmarken erkennen ( $\chi_1^2 = 2,012$ ,  $p > 0,10$ ). Durchgänge mit der Laufrichtung Arbeitsplatz hingegen weisen signifikante Unterschiede ( $\chi_1^2 = 8,6786$ ,  $p > 0,001$ ) bei der Anzahl der Entscheidungen im Sinne der lokalen und globalen Landmarken auf (Abb. 37 unten). Die lokalen Landmarken werden deutlich häufiger zur Orientierung verwendet als die globalen Landmarken.

Analysiert man die Daten einzelner Probanden (Abb. 38)), sieht man, dass über die Hälfte der Probanden sich mehr an den lokalen Landmarken orientiert haben. Jedoch bevorzugten einige auch die globalen Landmarken (siehe Proband-ID 1). Andere wiederum verwendeten beide Landmarkentypen gleich häufig (Proband-ID 7 und 17).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Probanden die Bewegungsentscheidungen im Training gelernt haben und ihre Entscheidungen im Sinne der lokalen Landmarken genauso häufig trafen wie im Sinne der globalen

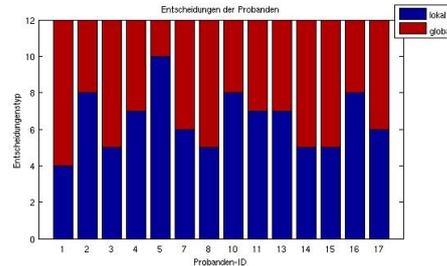


Abbildung 38: Entscheidungen in der Konfliktphase wurden nach Probanden getrennt. Es lässt sich erkennen, dass die Probanden unterschiedliche Landmarkentypen unterschiedlich oft bevorzugen.

Landmarken.

### 3.2 Verhalten in den Trainings- und Orientierungsphasen

**Training I:** In Training I konnte der Proband selbständig durch Hexatown laufen und seine Aufgabe war es, den kürzesten Weg zwischen den beiden Zielen Zuhause und Arbeitsplatz zu finden. Die durchschnittliche Anzahl der Hinwege lag dabei bei 2.8 und die der Rückwege bei 2.4 Versuchen, bis sie den kürzesten Weg gefunden hatten. Als Hinweg wird hierbei der Weg vom Zuhause zum Arbeitsplatz bezeichnet und als Rückweg der Weg vom Arbeitsplatz nach Hause. Dabei ist zu beachten, dass über die Hälfte nur 2 Versuche pro Weg brauchten und nur zwei Probanden 4–5 Anläufe pro Weg benötigten. Die Probanden hatten folglich alle den kürzesten Weg in beide Richtungen, also zum Arbeitsplatz und nach Hause, schnell gefunden.

**Training II:** In Training II konnten sich die Probanden nicht mehr frei bewegen. Es gab, wie in der Testphase auch, 12 Durchgänge, bei denen die falsch beantworteten Durchgänge so lange wiederholt wurden, bis alle richtig waren. Die Leistung der Probanden war so gut, dass maximal 4 Durchgänge wiederholt werden mussten, somit waren immerhin 70% von Anfang an richtig.

**Orientierungsphase:** Bei der Orientierungsphase wurden die Richtungseinschätzungen zu den Landmarken ausgewertet. In dieser Phase befand man sich an einer bekannten Kreuzung und sollte in Richtung der eingblendeten Ziele (2 x lokale Landmarken, 3 x globale Landmarken) deuten. Diese Phase wurde nur für 12 Probanden ausgewertet, da bei Zweien ein Programmfehler in diesem Teil des Experiments auftrat. Die Orientierungsphase fand zwei

| Ziel         | 1. Runde | 2. Runde |
|--------------|----------|----------|
| Frankfurt    | 89,66°   | 95,43°   |
| Zuhause      | 76,16°   | 72,34°   |
| Sydney       | 104,17°  | 96,83°   |
| Arbeitsplatz | 84,50°   | 69,04°   |
| Toronto      | 96,45°   | 92,20°   |

Tabelle 1: Mittlerer Fehler nach den beiden Runden und Zielen aufgetrennt.

Mal im Experiment statt und deshalb wird im Folgenden von 1. Runde und 2. Runde gesprochen. Schaut man sich alle 5 Richtungseinschätzungen an, so ist zu erkennen, dass die Probanden nur selten in die richtige Richtung deuteten (Abb. 39).

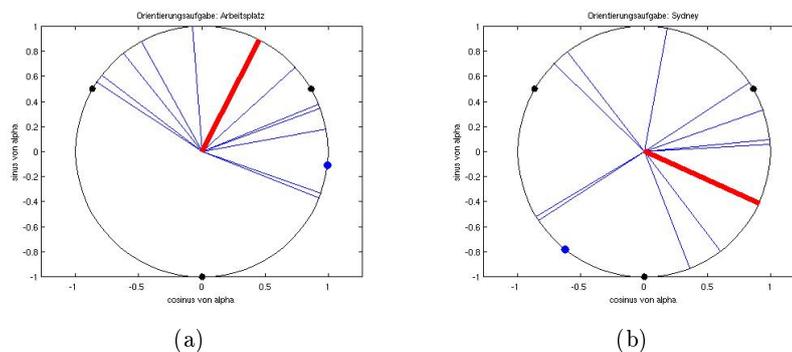


Abbildung 39: Richtungseinschätzungen in der Orientierungsphase. Das linke Bild zeigt die Richtungseinschätzungen mit dem geringsten mittleren Fehler (69,04°) und das rechte Bild mit dem höchsten mittleren Fehler (104,17°). Die rote Linie zeigt den mittleren Richtungsfehler und die blauen Linien veranschaulichen die Zeigeleistungen der einzelnen Probanden. Der blaue Punkt präsentiert das Ziel und die schwarzen Punkte die Straßen an der Kreuzung.

Die rote Linie zeigt den mittleren Richtungsfehler und die blauen Linien veranschaulichen die Zeigeleistungen der einzelnen Probanden. Der blaue Punkt präsentiert das Ziel und die schwarzen Punkte die Straßen an der Kreuzung. In der 2. Runde war nur eine geringe Verbesserung der Zeigeleistung zu erkennen. Der mittlere Fehler von Runde 1 beträgt 90,19° und in Runde 2 85,17°. In Tabelle 1 sind die mittleren Fehler für die einzelnen Ziele dargestellt.

### 3.3 Augenbewegungen

Neben den Bewegungsentscheidungen spielten in dieser Diplomarbeit die Augenbewegungen eine wichtige Rolle. Die Augenbewegungen wurden mit ei-

nem Eyetracker während des gesamten Navigationsexperiments aufgezeichnet. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl in den Trainingsphasen als auch in der Testphase die globalen Landmarken häufiger fixiert wurden als die lokalen. Während des gesamten Experiments fielen jedoch die meisten Blickvektoren auf „sonstige Objekte“ (schwarzer Balken in den Schaubildern). Dies beinhaltet Hintergrund, Straße, Wiese und Büsche und wird deshalb nicht weiter betrachtet, aber der Vollständigkeit halber weiterhin in den Schaubildern angegeben.

Abbildung 40 gibt einen Überblick, wie oft die lokalen Landmarken in den verschiedenen Phasen fixiert wurden. Die y-Achse zeigt die Anzahl der Fixationen und die x-Achse den jeweiligen Probanden. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Fixationen auf eine lokale Landmarke von Proband zu Proband unterschiedlich war und zwischen den verschiedenen Phasen variierte.

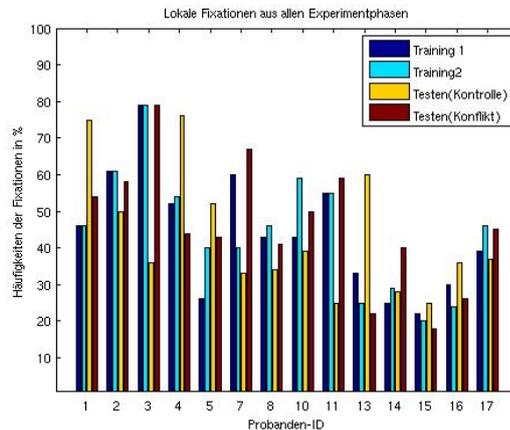


Abbildung 40: Überblick der Fixationen über alle Phasen

**Training I:** Im Training I wurden die globalen Landmarken bevorzugt angeschaut ( $\chi_1^2 = 119,2$ ,  $p < 0,05$ , Abb. 41). Auch wenn mehr lokale als globale Landmarken in der Szenerie des Experiments verwendet wurden, war die Summe der globalen Fixationen höher als die der lokalen. Unter den lokalen Landmarken wurden das Zuhause und der Arbeitsplatz am häufigsten angeschaut. Abbildung 40 zeigt, dass die Probanden 2, 3 und 7 besonders häufig die lokalen Landmarken anschauten und die Probanden 5, 14 und 15 dagegen hauptsächlich die globalen.

**Training II:** Während des Trainings II wurden die globalen Landmarken wie im Training I etwas häufiger angeschaut als die lokalen Landmarken ( $\chi_1^2 = 5,4599$ ,  $p < 0,05$ ). Dies ist in Abbildung 42 dargestellt, in welcher die

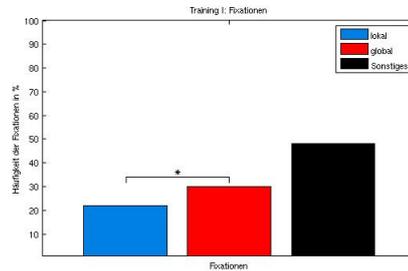


Abbildung 41: Fixationen in Training I. Die globalen Landmarken werden signifikant öfter angeschaut als die lokalen ( $N = 9009$ ).

Fixationen auf die verschiedenen Kreuzungen und Laufrichtungen aufgeteilt wurden. An Kreuzung A wurden zwar noch mehr lokale Landmarken angeschaut ( $\chi_1^2 = 58,5812$ ,  $p < 0,001$ ), an Kreuzung B jedoch deutlich mehr globale ( $\chi_1^2 = 106,8681$ ,  $p < 0,001$ ) und an Kreuzung C war das Verhältnis der Anzahl der lokalen und globalen Fixationen identisch ( $\chi_1^2 = 3,1125$ ,  $p > 0,1$ ). Außerdem ist zu sehen, dass die Probanden sich auf dem Weg in Richtung Arbeitsplatz eher global orientierten ( $\chi_1^2 = 27,1535$ ,  $p < 0,001$ ). In Richtung Zuhause konnte allerdings kaum ein Unterschied zwischen lokalen und globalen Landmarken festgestellt werden ( $\chi_1^2 = 1,1535$ ,  $p > 0,20$ ).

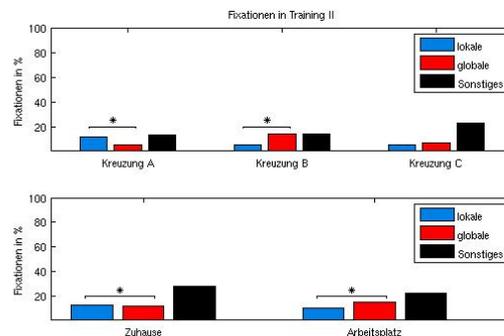


Abbildung 42: Fixationen in Training II nach Kreuzungen (oben) und Laufrichtungen (unten) getrennt ( $N = 3870$ ).

Insgesamt fixierten in den Trainingsphasen die Probanden häufiger die globalen Landmarken.

**Testphase:** Wie auch im Training I und II wurden in der Testphase die globalen Landmarken häufiger als die lokalen fixiert. Da es kaum Unterschiede in der Kontroll- und Konfliktphase gab, wird nur die Konfliktphase repräsentativ näher betrachtet.

Abbildung 43 zeigt die Fixationen in der Konfliktphase und verdeutlicht, dass die Anzahl der lokalen und globalen Fixationen an allen Kreuzungen signifikant unterschiedlich ist: An Kreuzung B wurden überwiegend die globalen Landmarken angeschaut ( $\chi_1^2 = 89,7117$ ,  $p < 0,001$ ) und an Kreuzung A eher die lokalen ( $\chi_1^2 = 53,0363$ ,  $p < 0,001$ ). Neben den beiden hoch signifikanten Effekten an Kreuzung A und B, gab es an Kreuzung C einen weiteren signifikanten Effekt. Die globalen Landmarken wurden dort häufiger angeschaut als die lokalen Landmarken ( $\chi_1^2 = 7,8662$ ,  $p < 0,01$ ). Teilte man die Fixationen nach den Laufrichtungen auf, konnte man auch dort in Richtung Arbeitsplatz feststellen, dass die Anzahl der Fixationen auf die lokalen Landmarken signifikant größer war ( $\chi_1^2 = 9,1915$ ,  $p < 0,01$ ). Die Fixationen in Laufrichtung Zuhause hingegen waren gleich verteilt.

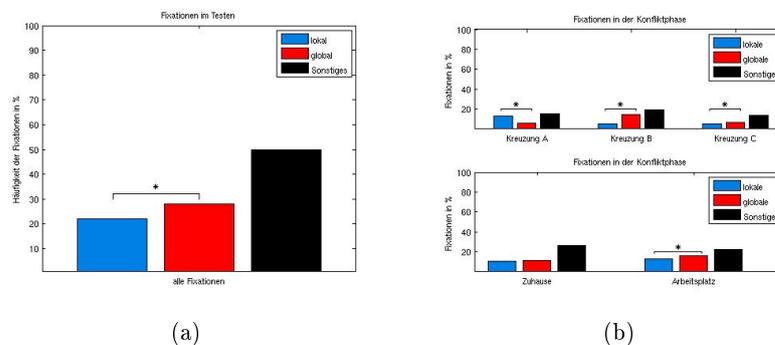


Abbildung 43: (a) Fixationen über beide Testphasen verteilt ( $N = 4336$ ). (b) Fixationen in der Konfliktphase nach Kreuzungen (oben) und Richtungen (unten) getrennt ( $N = 2184$ ).

Die durchschnittliche Fixationsdauer von lokalen und globalen Fixationen war fast identisch und lag im Durchschnitt bei 200 msec.

### 3.4 Zusammenhang zwischen Augenbewegungen und Entscheidungen

Bevor auf den Zusammenhang zwischen Fixation und Entscheidung eingegangen wird, noch ein interessanter Aspekt. Teilt man die Entscheidungen nach den Durchgängen auf, gibt es einige interessante Einzelfälle (Abb. 44). Bei Durchgang 3 haben sich alle 14 Probanden lokal entschieden und bei den Durchgängen 5 und 7 überwiegend global. Durchgang 7 ist weiterhin faszinierend, da die Probanden sich überwiegend global entschieden, aber fast nur lokale Landmarken fixiert haben (Abb. 45). Auch die Fälle 2 und 10 zeigen ein gegensätzliches Verhalten. Hier wurde überwiegend lokal entschieden, aber mehr global fixiert.

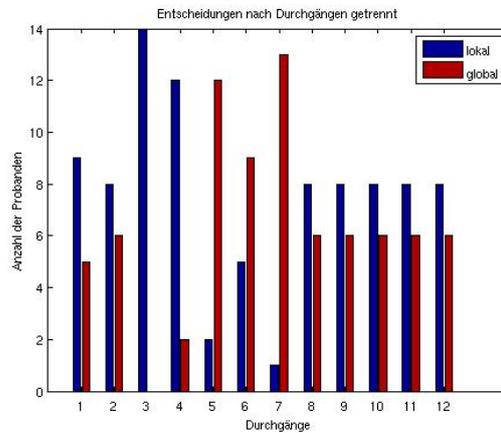


Abbildung 44: Entscheidungen nach den verschiedenen Durchgängen getrennt. Pro Durchgang konnte maximal der Wert 14 erreicht werden, da es 14 Probanden gibt.

Um den Zusammenhang zwischen Augenbewegung und Bewegungsentscheidung zu analysieren, wurden Korrelationen zwischen den Fixationsarten und der Bewegungsentscheidung berechnet, was bereits in Abschnitt 2.3.3 erläutert wurde. Für die folgende Auswertung habe ich mich auf die lokalen und globalen Landmarken fokussiert, da diese allein für meine Fragestellung von Bedeutung sind. Fixationen auf andere Objekte (z.B. Straße) wurden also nicht berücksichtigt. Als längste Fixation wurde die Fixation bezeichnet, deren Dauer während eines Durchgangs am längsten war. Häufigste Fixation bedeutet, dass die Summe der Anzahl der Fixationen am größten war. In Abbildung 46(a) ist die Korrelation zwischen der Fixationsart und der Bewegungsentscheidung aufgetragen. Als Fixationsarten werden vorletzte, letzte, häufigste und längste Fixation bezeichnet. Diese Abbildung zeigt, dass die letzte Fixation ( $\chi_1^2 = 1,4062$ ,  $p > 0,1$ ) gefolgt von der längsten ( $\chi_1^2 = 0,7562$ ,  $p > 0,3$ ) im Durchschnitt am besten mit der Bewegungsentscheidung korreliert. Bei der vorletzten ( $\chi_1^2 = 0$ ,  $p > 0,5$ ) und häufigsten Fixation ( $\chi_1^2 = 0$ ,  $p > 0,5$ ) hingegen war kaum ein Effekt zu erkennen. Jedoch war keine der Korrelationen statistisch signifikant.

Betrachtet man die Übereinstimmungen während der verschiedenen Durchgänge (Abb. refueb2, Appendix), lassen sich große Unterschiede feststellen. Im Durchgang 4 und 10 sind nur Antikorrelationen zu erkennen, im Gegensatz zu Durchgang 2 und 7. Auch die Fälle 6 und 12 sind sehr interessant, da sich die Probanden an der gleichen Kreuzung befanden und auf die gleichen lokalen und globalen Landmarken blickten, aber die Übereinstimmungen sehr verschieden waren.

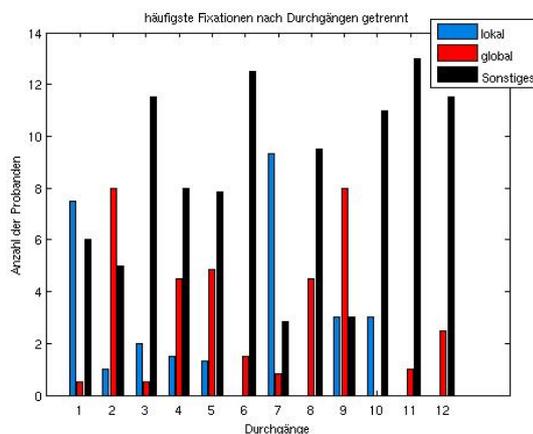
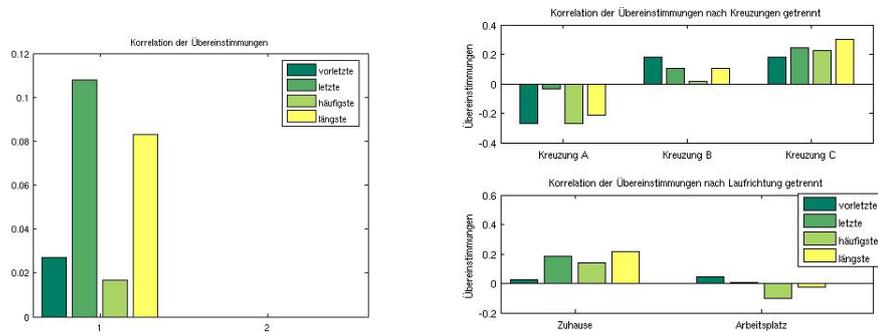


Abbildung 45: Die häufigsten Fixationen in der Konfliktphase nach Durchgängen getrennt (N = 14 pro Durchgang).

Abbildung 46(b) unten zeigt, dass die Laufrichtung für das Fixationsverhalten verantwortlich war. In dieser Abbildung ist die Abhängigkeit der verschiedenen Fixationsanalysen von der Laufrichtung aufgetragen. In Richtung Zuhause korrelierten die Fixationsarten mit den Bewegungsentscheidungen ganz gut, in Richtung Arbeitsplatz jedoch kaum. Die häufigste Fixation weist sogar eine Antikorrelation auf. Wurden Daten nach Kreuzungen aufgeteilt (Abb. 46(b) oben), läßt sich am ehesten ein Zusammenhang von Fixation und Entscheidung an Kreuzung C, besonders bei der längsten Fixation, feststellen. An Kreuzung A waren nur Antikorrelation zu sehen, an Kreuzung B und C korrelierten zwar alle Fixationsarten mit der Bewegungsentscheidung, aber nicht sehr gut. Insgesamt konnte man beobachten, dass an den verschiedenen Kreuzungen entweder fast alle Fixationsarten gut korrelierten oder fast alle Fixationsarten korrelierten schlecht.

Ein weiterer Analysepunkt bestand darin, die letzten und vorletzten Fixationen in Fixationen auf die rechte und linke Leinwandseite einzuteilen (Abb. 47). Dabei konnte die beste Korrelation von Fixation auf die rechte oder linke Leinwandhälfte und Richtungsentscheidung gefunden werden. Voraussetzung für eine gute Korrelation war, dass der Proband als letztes oder vorletztes ein Objekt auf der rechten bzw. linken Leinwandhälfte fixiert hat und dann auch rechts oder links abbiegt. Hier konnte eine Signifikanz bei der Übereinstimmung von vorletzter ( $\chi_1^2 = 3,49$ ,  $p < 0,05$ ) oder letzter Fixation ( $\chi_1^2 = 2,8982$ ,  $p < 0,05$ ) und der Richtungsentscheidung gefunden werden. Teilte man diese nach Richtungen (Abb. 70(b) unten, Anhang) auf, zeigte sich, dass in Richtung Zuhause die vorletzte Fixation besser korrelierte als die letzte. Teilte man die Werte nach Kreuzungen (Abb. 70(b) oben, Anhang) auf war an Kreuzung A ein gegenteiliges Verhalten von vorletzter und letzter Fixa-



(a) Übereinstimmungen

(b) Kreuzungen(oben) und Laufrichtungen (unten)

Abbildung 46: Es werden die Übereinstimmungen von Fixation und Entscheidung dargestellt. Maximal können 168 Übereinstimmungen (14 Probanden x 12 Durchgänge) erreicht werden.

tion zu beobachten. An Kreuzung B dominierte die letzte Fixation und an Kreuzung C korrelierte die vorletzte Fixation etwas besser also die letzte mit der Richtungsentscheidung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keine signifikante Korrelation zwischen der letzten, vorletzten, häufigsten oder längsten Fixation und der Bewegungsentscheidung zu erkennen war. Am besten korrelierte die letzte, gefolgt von der längsten Fixation mit der Bewegungsentscheidung. Der Ansatz, die Fixationen in Fixationen auf die rechte und linke Leinwandseite aufzuteilen und dann die Korrelation zwischen der Fixation und der Richtungsentscheidung zu errechnen, brachte ein signifikantes Ergebnis.

### 3.5 Fragebogen

Die Auswertung des Fragebogens ergab, dass alle Probanden fast täglich den Computer benutzen und die meisten auch regelmäßig Computerspiele spielen wie Ego-Shooter oder Strategiespiele. Bei Ego-Shooter handelt es sich um Computerspiele wie Counterstrike oder Quake, also Spiele bei denen mit verschiedenen Waffen gegen verschiedene Gegner gekämpft wird. Der Spieler sieht dabei alles aus der Perspektive einer virtuellen Person, deshalb auch Ego-Shooter. Beispiele für Strategiespiele sind Command & Conquer oder Civilization. Auch wurden Sportspiele wie z.B. Fußball genannt.

Die meisten schätzten sich in der Trainingsphase als durchschnittlich bis schlecht ein. In der Trainingsphase I wurde sehr oft die Strategie der Wegweisung verwendet. Die Probanden merkten sich dabei die Bewegungsentscheidungen z.B. links, rechts, rechts, was jedoch in Training II nicht mehr

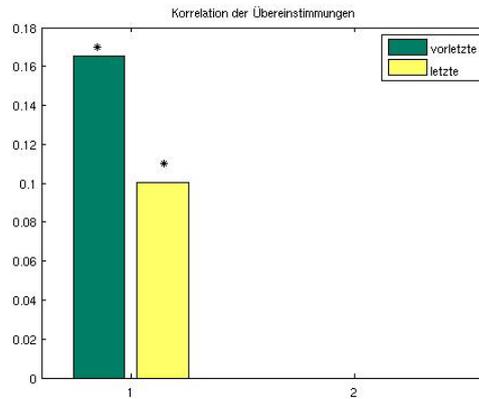


Abbildung 47: Fixationen wurden in Fixationen auf der rechten und linken Leinwandhälfte eingeteilt und dann mit dem Abbiegen in die rechte oder linke Straße verglichen

verwendet werden konnte. Lokale und globale Landmarken wurden als Entscheidungshilfen gleich häufig genannt. Nur 2 von 17 Probanden berichteten, dass sie das Vertauschen der globalen Landmarken im Testen bemerkt hatten. Diese beiden Probanden wurden, wie bereits erwähnt, von der Auswertung ausgeschlossen.

### 3.6 PTA-Test

Die Ergebnisse des PTA-Tests zeigen, dass alle Probanden in diesem Test gut abgeschnitten haben. Der Mittelwert lag bei 28,5 Punkten, wobei der Schlechteste bei 21 Punkten lag und der Beste bei 43 Punkten, was einer Standardabweichung von 5,8 entspricht. Ein Zusammenhang zwischen dem Abschneiden in der Kontrollphase und dem PTA-Test konnte nicht festgestellt werden.

## 4 Diskussion

### 4.1 Vergleich mit den Ergebnissen von S. Steck

Die Ergebnisse von S. Steck haben sich auch in dieser Diplomarbeit bestätigt. Bei den Bewegungsentscheidungen wurden beide Typen von Landmarken verwendet (Abb. 36). Zusätzlich wurden verschiedene Strategien angewandt, um die Aufgabe zu lösen. Es gab Probanden, welche die lokalen und andere, welche die globalen Landmarken bevorzugten. Außerdem gab es Unterschiede bei der Verwendung der Landmarken an den verschiedenen Kreuzungen und in den verschiedenen Laufrichtungen. Im Mittel wurden globale und lokale Landmarken jedoch gleich häufig angesehen. S. Steck fand weiterhin heraus, dass sich die Probanden an Kreuzung C mehr lokal orientieren und an Kreuzung A eher global. Der Effekt konnte für Kreuzung C, jedoch nicht für Kreuzung A repliziert werden. An Kreuzung C dienten die lokalen Landmarken häufiger zur Orientierung, da an dieser Kreuzung die lokalen Landmarken auffälliger waren (Abb. 48). Es standen dort eine Tankstelle, ein Wasserturm und ein Haus, welche sich von den anderen Gebäuden deutlich unterschieden. Eine weitere Beobachtung war, dass in der Laufrichtung mit dem Ziel Zuhause sich die Probanden häufiger global orientierten. Dies bedeutet, dass die Probanden die Skyline von Sydney deutlich häufiger nutzten, um nach Hause zu finden als die Frankfurter Skyline auf dem Weg zum Arbeitsplatz. Dies könnte darauf zurück zu führen sein, dass die Oper von Sydney deutlich salienter (auffälliger) ist, als die Hochhäuser von Frankfurt.



Abbildung 48: Kreuzung C mit den verschiedenen Anfahrtsrichtungen

Ähnlich wie in dem Experiment von S. Steck hatten nur wenige Probanden (12 %) von dem Informationskonflikt in der Konfliktphase berichtet. Daraus lässt sich schließen, dass sie die Information der lokalen Landmarken nicht bewusst mit der Information der globalen Landmarken verknüpften. Dies stellt eine Ähnlichkeit mit „change blindness“ Experimenten dar. Diese Experimente befassen sich damit, ob Veränderungen in zwei ähnlichen Bildern wahrgenommen werden (Simons & Levin, 1997).

Interessant ist, dass die beiden Probanden, die den Konflikt bemerkt haben, in der Kontrollphase schon sehr gut gewesen sind, nur einen Fehler hatten, und überdurchschnittlich oft die globalen Landmarken anschauten. Auch im

PTA- Test schnitten sie mit Werten von 29 und 43 überdurchschnittlich gut ab.

## 4.2 Verhalten in den Trainings- und Orientierungsphasen

**Training I:** Im Training I zeigte die Auswertung der Anzahl der Hin- und Rückwege, dass die Probanden den kürzesten Weg schnell gelernt hatten und nur wenige über 3 Versuche pro Weg brauchten. Dabei ist zu beachten, dass der kürzeste Weg in eine Richtung so lange wiederholt wurde, bis der Proband auch den kürzesten Weg in die andere Laufrichtung gefunden hatte. Dies konnte bedeuten, dass ein Proband ziemlich schnell den kürzesten Weg in die eine Richtung gefunden hatte, aber dann für die andere Richtung mehrere Anläufe brauchte, um den kürzesten Weg zu finden. Alle Probanden haben es geschafft, den kürzesten Weg in beide Richtungen zu finden.

**Training II:** Auch in Training II lernten die Probanden die verschiedenen Bewegungsentscheidungen ziemlich schnell. Diejenigen, die sich in Training I mit Hilfe der Wegweisung z.B. rechts, rechts, links die Wege gemerkt hatten, hatten zu Beginn einige Probleme, da sie kaum auf die Landmarken geachtet hatten. Sie mussten also ihre Strategie wechseln, was sie auch im Fragebogen berichteten. Aber auch diese Probanden lernten nach einigen Wiederholungen alle Bewegungsentscheidungen.

Eine weitere Beobachtung war, dass bei fast allen Probanden, die einen Durchgang wiederholen mussten, der erste Durchgang betroffen war. Dies traf zu, obwohl Kreuzung A die erste Kreuzung war, wenn die Probanden von Zuhause zum Arbeitsplatz liefen. An dieser Kreuzung sah man links die Frankfurter Skyline und die lokale Landmarke war ein Haus. Die auffällig hohe Fehlerrate bei diesem Durchgang könnte daran liegen, dass sich die Probanden gemerkt hatten, dass der Arbeitsplatz vor der Frankfurter Skyline steht. Dies war auch richtig, jedoch durfte man an dieser Kreuzung der Skyline noch nicht direkt folgen. Eine andere Möglichkeit ist, dass man sich zu Beginn eher global umsieht, um eine grobe Richtungseinteilung (Kompass) in der Umgebung zu erhalten. Daher wird die erste lokale Landmarke, die einem auf dem Weg begegnet, gerne übersehen. Im ersten Durchgang führte dies dann zu Verwirrung, weil der Proband nicht einschätzen konnte, an welcher Kreuzung er sich befand. Diese Beobachtung, dass die Probanden im ersten Durchgang so schlecht abschneiden, ist verwunderlich, da man sich nach Glanzer und Cunitz (1966) das, was man als erstes lernt, am besten merkt.

**Orientierungsphase:** In der Orientierungsphase wussten nur wenige Probanden, in welcher Richtung sich die Ziele befanden und deshalb zeigte die Mehrzahl der Probanden willkürlich in eine Richtung, egal welches Ziel präsentiert wurde. Erstaunlich war, dass die Meisten bis zu diesem Zeitpunkt das Zuhause nicht mit der Skyline von Sydney verbanden und den Arbeitsplatz nicht mit der globalen Landmarke "Frankfurt". Das deutet darauf hin, dass die Probanden im Training I die globalen Landmarken nicht mit dem Zielen assoziierten oder die Kreuzung nicht erkannten und deshalb die Ziele kaum zuordnen konnten.

Die Genauigkeit des Zeigens war in der zweiten Runde kaum besser, jedoch konnten Zusammenhänge von Zuhause und der Skyline von Sydney oder dem Arbeitsplatz und der Skyline von Frankfurt erkannt werden, was den durchschnittlichen Fehler etwas verringerte. Eine Vermutung war, dass sich die Probanden nach den Straßen orientierten und deshalb die Richtungsleistung so schlecht war. Jedoch konnte das nur in einem Fall nachgewiesen werden.

### 4.3 Augenbewegungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Phasen noch einmal genauer betrachtet, wobei der Schwerpunkt auf der Auswertung der Fixationen liegt. Wie bereits erwähnt, zeigen die Ergebnisse, dass die globalen Landmarken häufiger fixiert wurden als die lokalen. Dies könnte darauf hinweisen, dass die globalen Landmarken benötigt werden, um eine kognitive Karte aufzubauen. Die kognitive Karte gibt Informationen über die Landmarkenkonfiguration, also die Anordnung der verschiedenen Bezugspunkte, und hilft somit den Ort, wiederzuerkennen und zu entscheiden, in welche Richtung man gehen muss, um das Ziel zu erreichen (Tolman, 1948; O'Keefe & Nadel, 1978; Mallot, 1999).

Im Training I und Training II wurden die globalen Landmarken etwas häufiger fixiert als die lokalen (Abb. 62a, Anhang), besonders wenn in Richtung Arbeitsplatz (Abb. 62b, Anhang) gelaufen wurde. Das könnte bedeuten, dass die Probanden den Arbeitsplatz mit der Frankfurter Skyline verbanden und somit diese Skyline häufiger fixierten, was sich allerdings in der Konfliktphase in den Bewegungsentscheidungen und der Orientierungsaufgabe nicht widerspiegelte.

Auch in der Testphase wurden die globalen Landmarken häufiger fixiert als die lokalen Landmarken (Abb. 65a, Anhang), obwohl sich die Mehrzahl der Probanden im Sinne der lokalen Landmarken entschied. In der Kontrollphase fiel darüber hinaus auf, dass an Kreuzung B (Abb. 66(b)a oben, Appendix) besonders häufig die globalen Landmarken angeschaut wurden, aber in den beiden Laufrichtungen (Abb. 66(b)a unten, Appendix) kein Unterschied zu

erkennen war. Auch in der Konfliktphase trat dieser Effekt auf und wurde sogar noch verstärkt. Dies lässt sich vielleicht dadurch erklären, dass an dieser Kreuzung B keine auffälligen lokalen Landmarken standen. In jeder Laufrichtung war hingegen, egal ob das Ziel Zuhause oder Arbeitsplatz war, immer eine globale Landmarke klar und deutlich zu erkennen, was an den anderen Kreuzungen nicht unbedingt sein musste (Abb. 25). Des Weiteren war es an dieser Kreuzung ziemlich schwierig, sich ohne globale Landmarken zu orientieren. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Probanden den Informationskonflikt vielleicht unbewusst bemerkt hatten und deshalb häufiger die globalen Landmarken anschauten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die globalen Landmarken häufiger fixiert wurden und wahrscheinlich auch für die Orientierung wichtig waren, jedoch die Bewegungsentscheidungen nicht direkt damit in Zusammenhang gebracht werden können.

#### 4.4 Zusammenhang von Fixation und Entscheidung

Neben der längsten, häufigsten und letzten Fixation wurde noch die vorletzte Fixation ausgewertet. Der Zusammenhang zu den Bewegungsentscheidungen war jedoch noch geringer als in allen anderen Fällen. Die letzte Fixation korrelierte am besten mit der Bewegungsentscheidung. Dies deutet darauf hin, dass es einen Zusammenhang zwischen den Augenbewegungen und der Entscheidung geben könnte, auch wenn in diesem Experiment keine signifikanten Effekte zu erkennen waren. Von ähnlichen Ergebnissen berichteten auch Land & Hayhoe (2001), die Verhaltensmuster im alltäglichen Leben untersuchten. Es gab auch einige Probanden, bei denen die Dauer der Fixation und die Bewegungsentscheidung gut korrelierten, aber im Durchschnitt war auch kein Effekt zu sehen. Dabei war es möglich, dass einige Probanden schon bevor sie die Entscheidungskreuzung erreicht hatten, eine Entscheidung getroffen und ihre Entscheidung an der Entscheidungskreuzung nur noch überprüft hatten, sodass sehr wenige oder gar keine Fixationen gemessen wurden. Ein weiteres Problem war, dass die lokalen Landmarken immer direkt vor dem Probanden standen und die globalen meistens rechts oder links am Leinwandrand, was dazu führte, dass die Probanden, wenn sie einfach nur geradeaus schauten, die lokalen Landmarken fixierten.

Die großen Unterschiede zwischen den Korrelationen von vorletzter Fixation und Entscheidung bzw. letzter Fixation und Entscheidung lassen sich so erklären, dass sich der Proband bei der vorletzten Fixation noch einmal umschaute und noch einmal die Landmarke anschaute, die für die Richtungsentscheidung nicht relevant war, um diese auszuschließen. Danach fixierte er die Landmarke, die für die Entscheidung wichtig war, um die getroffene Entscheidung zu überprüfen (Abb. 35).

Die Unterschiede zwischen den Korrelationen von häufigster und längster

Fixation und der Entscheidung entstanden dadurch, dass bei der Anzahl der Fixationen die Dauer keine Rolle spielte, solange das Fixationskriterium von 100 ms erfüllt war und bei der Dauer die Anzahl der Fixationen unabhängig war. Eine Vermutung war in diesem Zusammenhang, dass der Proband ein Objekt länger oder häufiger anschaut, um möglichst viele Informationen für die Bewegungsentscheidung zu sammeln.

#### 4.5 PTA-Test

Die Ergebnisse des PTA-Tests zeigten für alle Probanden gute Ergebnisse. Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Fehleranzahl in der Kontrollphase und dem Abschneiden in dem PTA-Test konnte nicht gefunden werden. Zwar schnitten die Probanden, die 3 oder 4 Fehler hatten, auch im Durchschnitt schlechter ab (Mittelwert: 25.8) als die Probanden, die bis zu 2 Fehlern (Mittelwert: 29.8) hatten, aber immer noch weit über dem Grenzwert von 20 Punkten. Dies lässt sich dadurch begründen, dass der PTA-Test ein „mental-rotation“-Test ist und somit nicht unbedingt mit der Navigationsaufgabe in dieser Diplomarbeit direkt verglichen werden kann.

#### 4.6 Hypothese und weitere Beobachtung

Nachdem die Verhaltensweisen der Probanden in den verschiedenen Phasen erläutert wurden, werden nun die Hypothesen genauer betrachtet. Die erste Hypothese war, dass es eine Korrelation zwischen der Fixationshäufigkeit bzw. -dauer und dem Verhalten in der virtuellen Umgebung während der Wegfindeaufgabe gibt. Die zweite Hypothese stützte sich auf die letzte Fixation und das Entscheidungsverhalten.

Beide Hypothesen konnten nicht nachgewiesen werden, jedoch gab es Tendenzen bei der letzten Fixation und der Fixationsdauer. Diese Tendenzen reichen jedoch nicht aus, um die Hypothese zu stützen, dass Landmarken in dieser Aufgabenstellung anhand von Augenbewegungen identifiziert werden können. Trotzdem konnte das Experiment dabei weiterhelfen, das Verhalten von Augenbewegung und dem Verhalten in einer Wegfindeaufgabe besser zu verstehen.

Auch wenn die beiden Hypothesen, dass entweder die letzte oder längste Fixation mit der Entscheidung korreliert, nicht nachgewiesen werden konnten, gab es eine interessante Beobachtung. Teilte man die Fixationen in Fixationen auf der rechten und linken Seite der Leinwand ein, dann konnte man erkennen, dass bei Probanden, die sich für den rechten Weg entschieden, auch die letzte Fixation sehr häufig auf der rechten Seite der Leinwand lag und umgekehrt. Dies lässt sich dadurch rechtfertigen, dass man, bevor man in eine bestimmte Richtung geht, auch dort hinblickt. Diese Theorie passte

am besten zu unseren Daten, und es konnte auch eine Signifikanz erzielt werden. Diese Beobachtung hat mit der eigentlichen Fragestellung zwar nichts zu tun, da man auf diese Weise keine Landmarken identifizieren kann, ist aber trotzdem ein interessanter Effekt.

## 5 Fazit

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Bedeutung von lokalen und globalen Landmarken und der Augenbewegungen anhand eines Navigationsexperiments in einer virtuellen Umgebung zu untersuchen. Dazu saßen die Probanden mit einem Eye- und Headtracker auf dem Kopf vor einer  $150^\circ \times 70^\circ$  Leinwand und konnten mithilfe einer Tastatur durch die virtuelle Stadt navigieren und verschiedene Aufgaben lösen. Der wichtigste Teil des Experimentes war die Testphase, die sich in Kontroll- und Konfliktphase unterteilte. In der Kontrollphase wurde überprüft, ob der Proband die verschiedenen Bewegungsentscheidungen gelernt hatte. In der Konfliktphase hingegen gab es einen Informationskonflikt mit dessen Hilfe herausgefunden werden sollte, welcher Typ von Landmarke, für die Lösung der Navigationsaufgabe, bevorzugt wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass die vorletzte Fixation vor einer Entscheidung oder auch die häufigste Fixation während eines Durchgangs nicht mit der Bewegungsentscheidung korreliert. Am besten korrelierte die letzte Fixation gefolgt von der längsten Fixation während eines Durchgangs mit der Bewegungsentscheidung, jedoch war auch dieser Zusammenhang nicht signifikant.

Das Fehlen eines signifikanten Effektes könnte daran liegen, dass die Landmarken zu groß waren und aus diesem Grund auch ohne Fixationen wahrgenommen werden konnten und/oder die Aufgabe zu einfach war, um einen eindeutigen Effekt hervorzurufen. Einige Probanden hatten ihre Entscheidung schon an der ersten Kreuzung getroffen, da diese bereits an der ersten Kreuzung ableiten konnten, wie die nächste Kreuzung aussehen würde und wie sie dann weiterlaufen müssten. Sicher hatten auch einige Probanden den Konflikt unbewusst bemerkt und waren dadurch verwirrt. Dies könnte die hohe Anzahl an Blickvektoren, aber eher geringe Anzahl an Fixationen erklären.

Es ist durchaus sinnvoll, weitere Probanden zu testen, da bei einigen ein Effekt zu erkennen war und vielleicht ein paar Veränderungen ein deutlicheres Ergebnis bringen könnten. Zuerst sollte man das Experiment in der Hinsicht ändern, dass die Probanden nicht an einer Kreuzung, sondern zwischen zwei Kreuzungen starten, damit sie nicht schon an der ersten Kreuzung Informationen sammeln können. Zusätzlich sollte man mehr Fixationen erzwingen, indem man die Landmarken verändert. Die Landmarken dürfen nicht so schnell zu erkennen sein. Dazu könnte Form und Größe verändert oder vielleicht Nebel eingesetzt werden. Dann müsste man nämlich die Landmarken genauer anschauen, um sie unterscheiden zu können. Auch wäre es besser, wenn die lokalen Landmarken nicht direkt vor dem Probanden stehen, da sie sonst auch unabsichtlich angeschaut werden, wenn der Proband einfach

nur geradeaus schaut. Ein Zeitlimit an der Entscheidungskreuzung wäre eine weitere Möglichkeit, um die Aufgabe schwerer zu machen. Darüber hinaus wären mehrere Wiederholungen der verschiedenen Durchgänge sinnvoll, damit das Raten reduziert werden kann.

Interessant wäre es natürlich auch, den Effekt von Fixationen auf eine Leinwandseite und der dazugehörigen Richtungsentscheidung weiter zu untersuchen, da dies ein Verhalten aufzeigt, welches uns in unserem täglichen Leben häufig begegnet. Stellen Sie sich vor, Sie gehen einen Weg entlang und wollen an der nächsten Kreuzung abbiegen. Sie werden dann sicher, bevor Sie die Seitenstraße betreten, in diese Richtung schauen, um abzuklären, ob es dorthin einen Weg gibt, die Straße in dieser Richtung frei ist, oder Hindernisse in dieser Richtung zu erwarten sind. Genau dieser Effekt wurde auch in dieser Diplomarbeit beim Analysieren des Navigationsverhaltens während einer Wegfindaufgabe beobachtet.

## A Versuchsanweisung

Das Experiment besteht aus 3 Abschnitten:

- 2 Trainingsphasen, die jeweils durch eine Zeigeaufgabe unterbrochen werden
- und einem abschließendem Test

Sie befinden sich in einer virtuellen Stadt, welche aus Plätzen, Straßen und Dingen an denen Sie sich orientieren können, besteht. Sie können sich mit Hilfe der Pfeiltasten in dieser Welt bewegen.

Jedoch gibt es einige Einschränkungen:

- An den Kreuzungen können Sie sich immer nur um 60 Grad drehen
- Geradeaus ist nur möglich, wenn Sie in eine Straße blicken. Jedoch sind nicht alle Straßen passierbar, es gibt auch Sackgassen.
- Wenn Sie gerade ausfahren wollen, geben Sie nur den Anstoß dazu, können aber nicht während der Fahrt zur nächsten Kreuzung anhalten oder die Geschwindigkeit regulieren.
- Die Strecken sind alle gleich lang.

**Fixkreuz** Zwischen den verschiedenen Abschnitten und gleich zu Beginn wird ein Kreuz auf dem Bildschirm erscheinen, welches Sie fixieren sollen. Beim Fixieren bitte nicht bewegen und das Kreuz anschauen.

**Training I** Sie sollen sich nun mit der Stadt vertraut machen und dabei den Weg zwischen dem gelben Haus, Ihrer Wohnung, und dem braunen Gebäude, Ihrer Arbeitsplatz, suchen.

Nachdem Sie die Stadt kennen gelernt haben, ist es Ihre Aufgabe von Ihrer Wohnung (gelbes Haus), den kürzesten Weg zu Ihrem Arbeitsplatz (braunes Haus), und wieder zurück zu finden. Dies wird solange wiederholt, bis Sie den kürzesten Weg gefunden haben. Überflüssige Drehungen auf der Stelle werden auch als Fehler gewertet. Wenn Sie das Ziel erreicht haben, wird Ihnen angezeigt, ob Sie den kürzesten Weg gefunden haben.

**Zeigeaufgabe** Sie befinden sich jetzt an einer bekannten Kreuzung und Ihre Aufgabe ist es nun sich so zu drehen, dass Sie in Richtung des unten rechts eingblendeten Ziels blicken. Dazu bitte wieder die Pfeiltasten verwenden. Nachdem Sie sich in die gewünschte Richtung gedreht haben, drücken Sie bitte die Leertaste. Die gesuchten Objekte wurden für diesen Versuchsteil entfernt.

**Training II** Jetzt beginnt die zweite Hälfte der Trainingsphase. Ihnen wird nun auf dem Bildschirm unten rechts das Ziel (das gelbe Haus oder das braune Haus) gezeigt.

Nachdem Sie die Leertaste gedrückt haben, werden Sie an eine Kreuzung transportiert, die Sie kennen und von der aus Sie den Weg fortsetzen sollen. Sie sollen dann entscheiden, ob Sie links oder rechts weiterfahren müssen, um das Ziel zu erreichen. Nach der Entscheidung wird der Durchgang abgebrochen und das nächste Ziel erscheint.

Dies wird solange wiederholt, bis alle Entscheidungen richtig sind. Bei dieser Aufgabe bekommen Sie nach jeder Entscheidung ein Feedback.

**Test** Der nun folgende Test, ist wie das Training II aufgebaut, jedoch gibt es kein Feedback. Sie werden wieder an eine Kreuzung gefahren und entscheiden, in welche Richtung der Weg fortgesetzt werden soll. Danach wird abgebrochen und das nächste Ziel erscheint.

## B Fragebogen zu dem Experiment

Wie oft arbeiten Sie mit dem Computer?

- täglich
- hin und wieder
- wöchentlich
- überhaupt nicht
- monatlich

Spielen Sie Computerspiele?

- ja
- nein

Wenn ja: Was für Spiele und wie oft?

Ist Ihnen während des Experiments etwas aufgefallen?

- ja
- nein

Wenn ja: Versuchen Sie bitte dies in Worte zu fassen

---

---

Wie schätzen Sie sich in der Trainingsphase ein?

- gut
- durchschnittlich
- schlecht

Haben Sie bei dem Weg nach Hause oder zur Arbeit irgendwelche Strategien verwendet?

- ja
- nein

Wenn ja: Versuchen Sie bitte diese zu beschreiben

---

---

Haben Sie sich die Abfolge links-rechts gemerkt?

- ja
- nein

Wenn ja: Wann haben Sie diese Strategie im Experiment verwendet?

- immer
- hin und wieder
- nie
- am Anfang
- am Schluss
- in der Mitte

Haben Sie an bestimmten Gebäuden eine Bewegungsentscheidung festgemacht?

- ja
- nein

Wenn ja: Wann haben Sie diese Strategie im Experiment verwendet?

- immer
- hin und wieder
- nie
- am Anfang
- am Schluss
- in der Mitte

Haben Sie sich gemerkt auf welches Gebäude Sie jeweils zugefahren sind, wenn Sie z.B. auf dem Weg nach Hause sind? Haben Sie sich mit diesem Wissen auf dem Rückweg entschieden, weg von dem Gebäude zu fahren?

- ja
- nein

Wenn ja: Wann haben Sie diese Strategie im Experiment verwendet?

- immer
- hin und wieder
- nie
- am Anfang
- am Schluss
- in der Mitte

Haben Sie sich mit Hilfe der von mehreren Plätzen sichtbaren, weit entfernten Landmarken (verschiedene Skylines) orientiert?

- ja
- nein

Wenn ja: Wann haben Sie diese Strategie im Experiment verwendet?

- |                                      |                                    |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| <input type="radio"/> immer          | <input type="radio"/> am Anfang    |
| <input type="radio"/> hin und wieder | <input type="radio"/> am Schluss   |
| <input type="radio"/> nie            | <input type="radio"/> in der Mitte |

## C Versuchsumgebung

### C.1 Kreuzungen in Hexatown



Abbildung 49: Kreuzung A vgl. Abb. 25



Abbildung 50: Kreuzung B vgl. Abb. 25



Abbildung 51: Kreuzung C vgl. Abb. 25

C.2 Landmarken in Hexatown

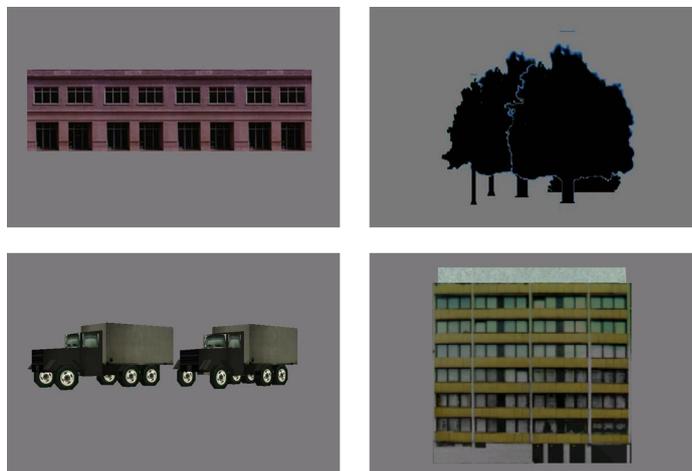


Abbildung 52: Landmarken 0–4



Abbildung 53: Landmarken 5–8

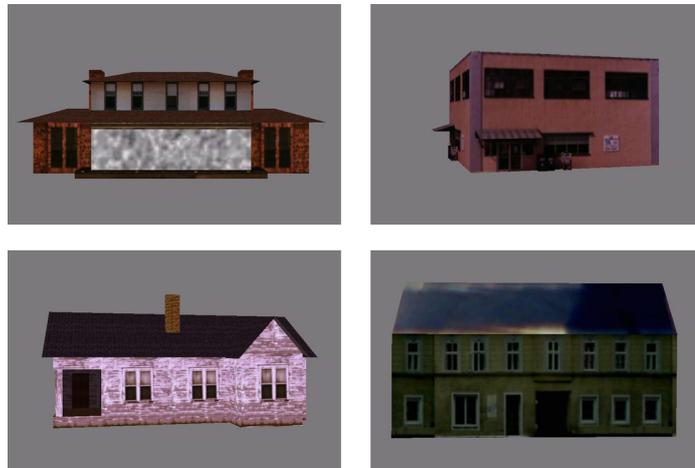


Abbildung 54: Landmarken 9–12

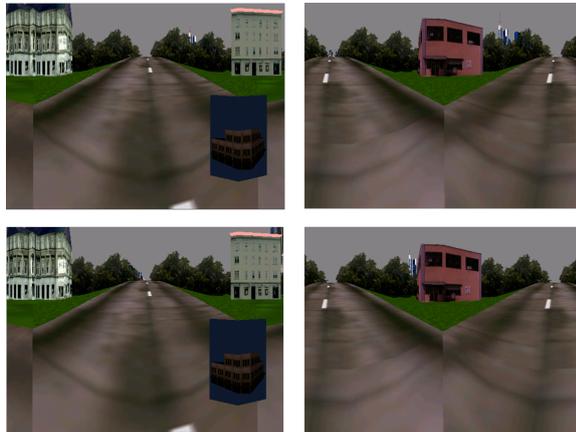


Abbildung 55: Landmarken 13–16

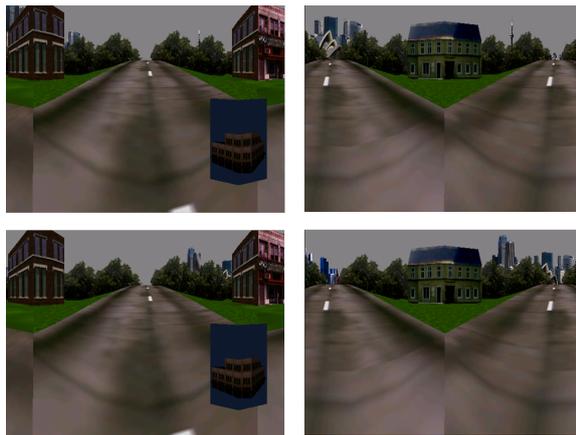


### C.3 Anfahrtswege bei den Bewegungsentscheidungen

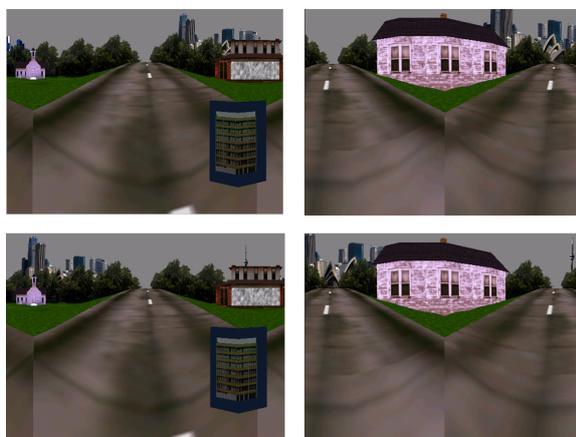
#### Kreuzung A



(a) Durchgang 1



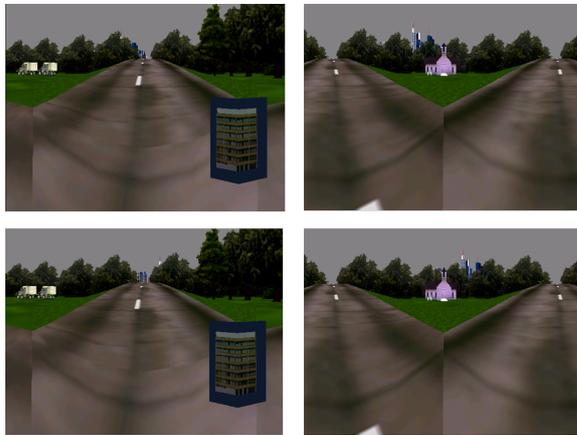
(b) Durchgang 4 und 10



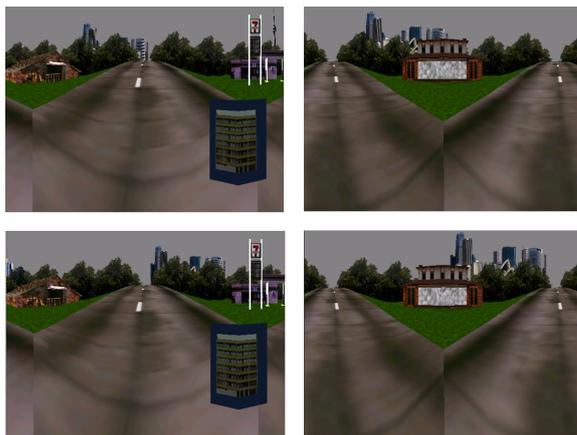
(c) Durchgang 7

Abbildung 58: Kreuzung A: Kontrollphase oben und Konfliktphase unten

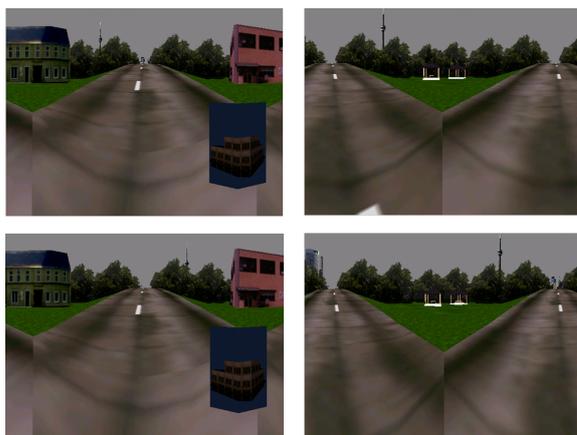
**Kreuzung B**



(a) Durchgang 2 und 8



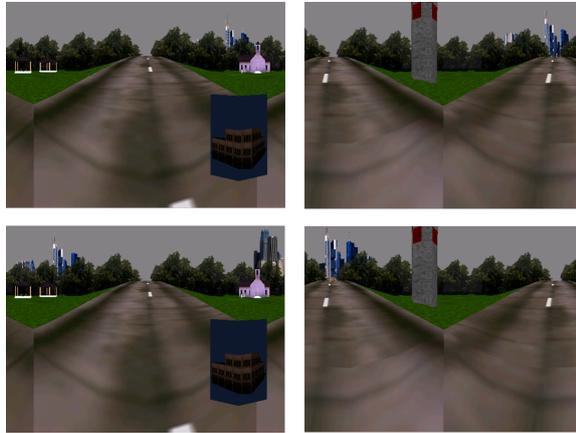
(b) Durchgang 5



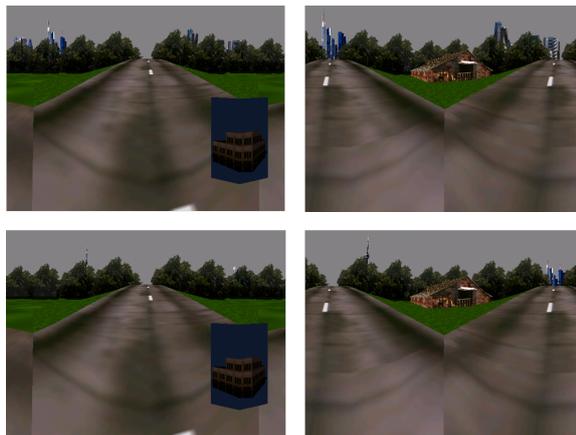
(c) Durchgang 11

Abbildung 59: Kreuzung B: Kontrollphase oben und Konfliktphase unten

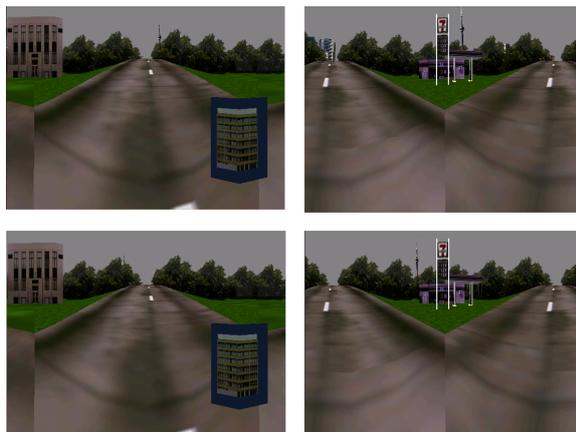
## Kreuzung C



(a) Durchgang 3



(b) Durchgang 6 und 12



(c) Durchgang 9

Abbildung 60: Kreuzung C: Kontrollphase oben und Konfliktphase unten

## D weitere Ergebnisse

### D.1 Trainingsphasen

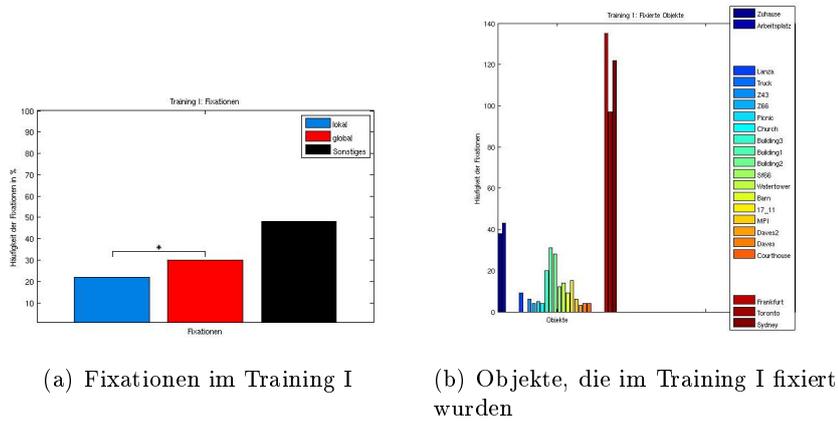


Abbildung 61: Trainingsphase I

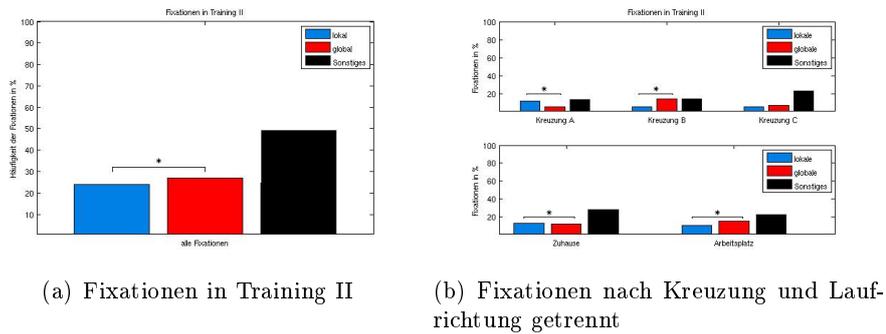


Abbildung 62: Fixation in Trainingsphase II

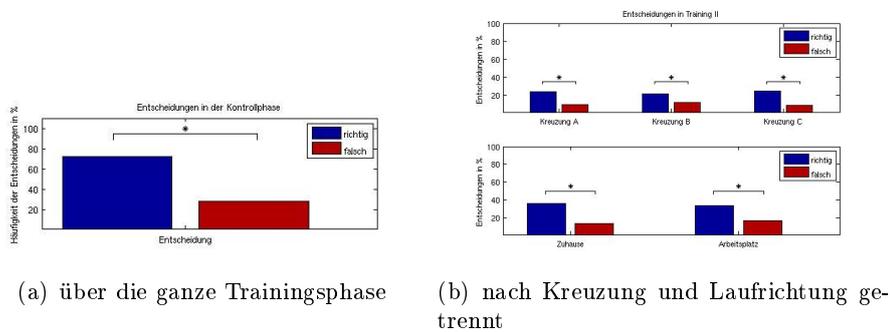
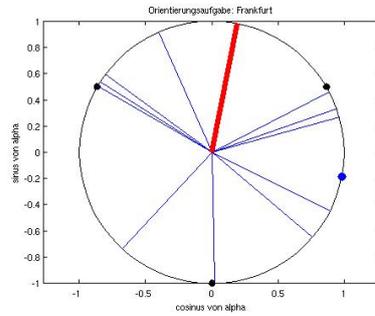
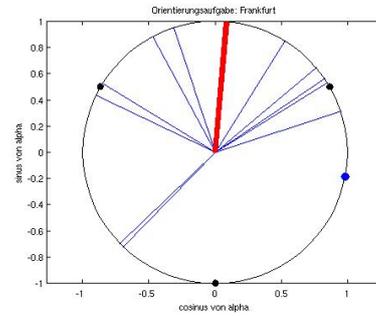


Abbildung 63: Bewegungsentscheidungen in Trainingsphase II

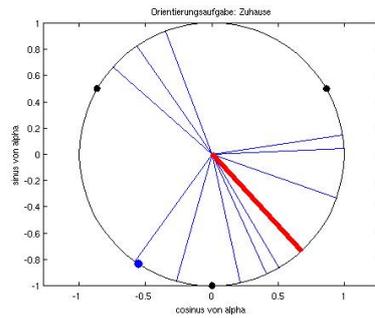
## D.2 Orientierungsphase



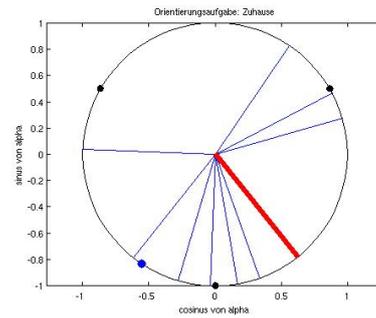
(a) 1. Runde: Frankfurt



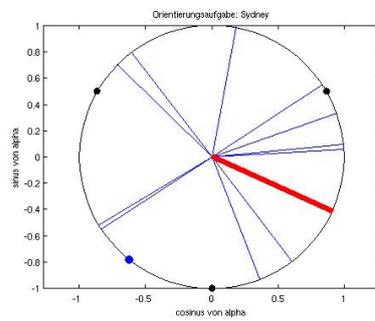
(b) 2. Runde: Frankfurt



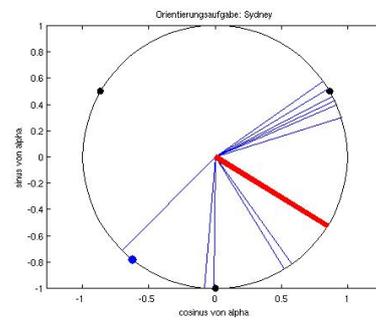
(c) 1. Runde: Zuhause



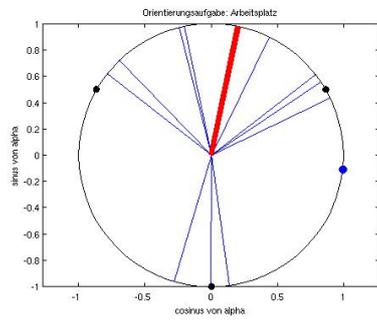
(d) 2. Runde: Zuhause



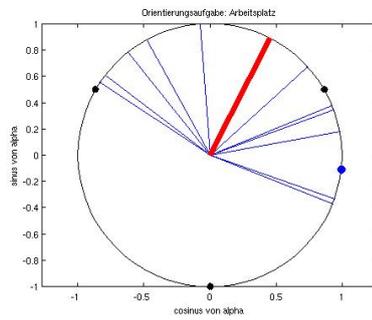
(e) 1. Runde: Sydney



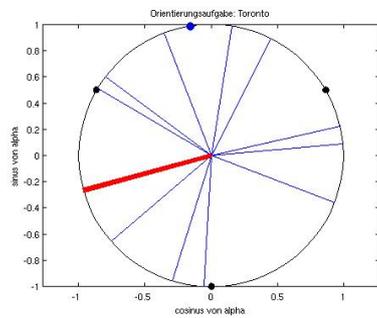
(f) 2. Runde: Sydney



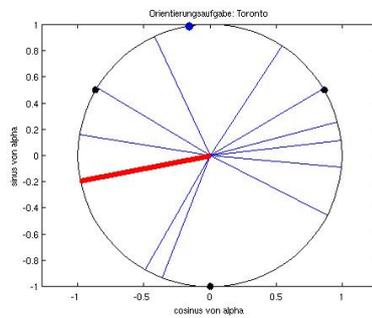
(g) 1. Runde: Arbeitsplatz



(h) 2. Runde: Arbeitsplatz



(i) 1. Runde: Toronto



(j) 2. Runde: Toronto

Abbildung 64: Richtungseinschätzungen in der Orientierungsphase

D.3 Testphase

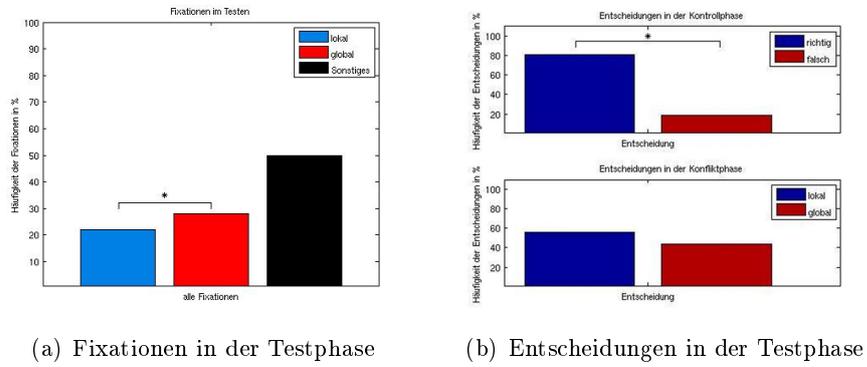


Abbildung 65: Testphase

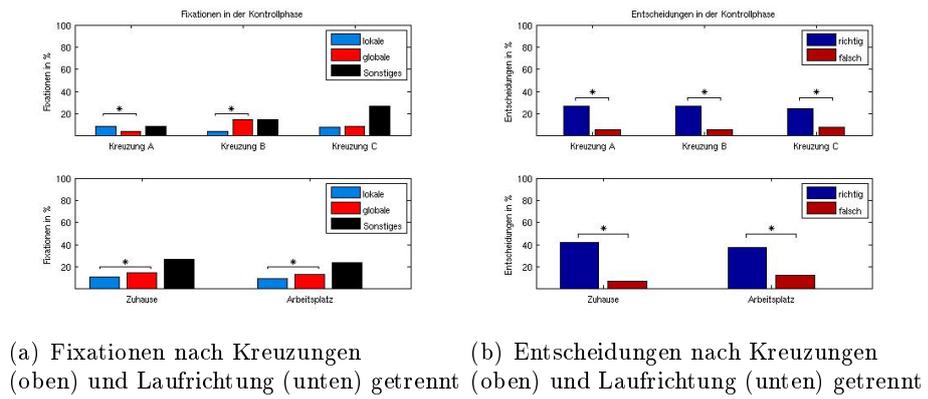


Abbildung 66: Kontrollphase

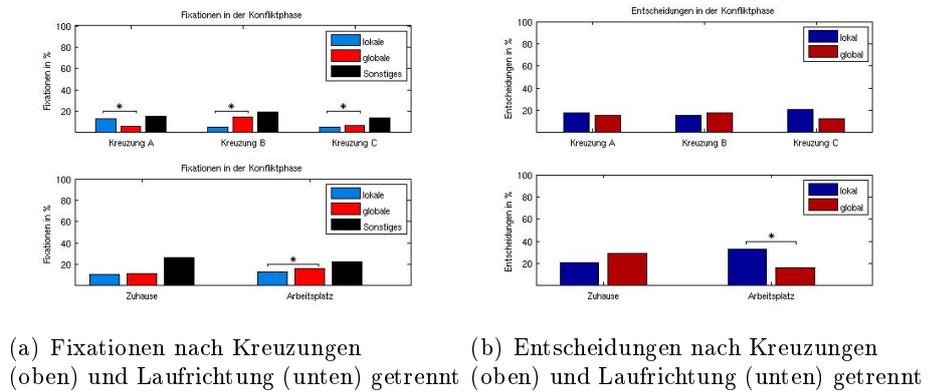
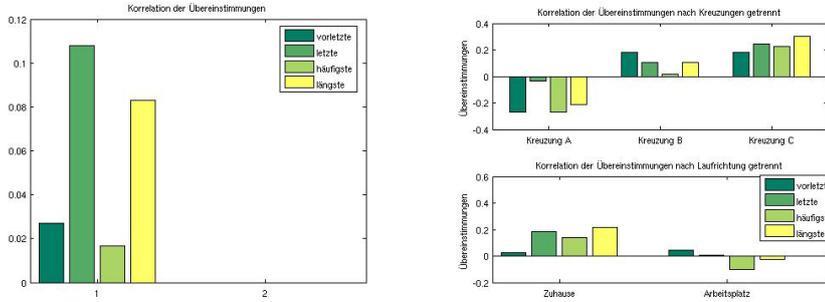


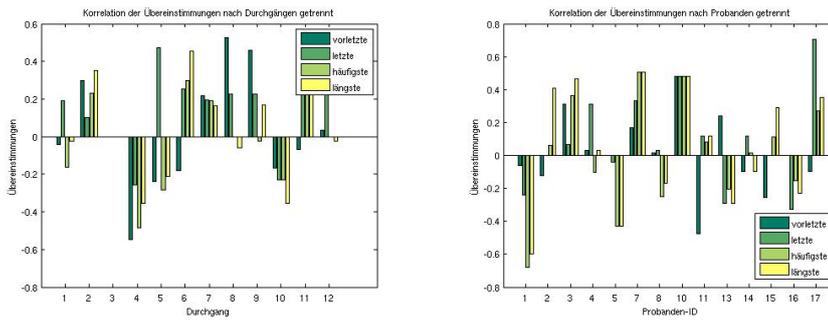
Abbildung 67: Konfliktphase

### D.4 Korrelationen von Bewegungsentscheidung und Augenbewegungen



(a) über alle Durchgänge und Probanden (b) nach Kreuzung und Laufrichtung getrennt

Abbildung 68: Korrelation von Bewegungsentscheidung und Fixationen

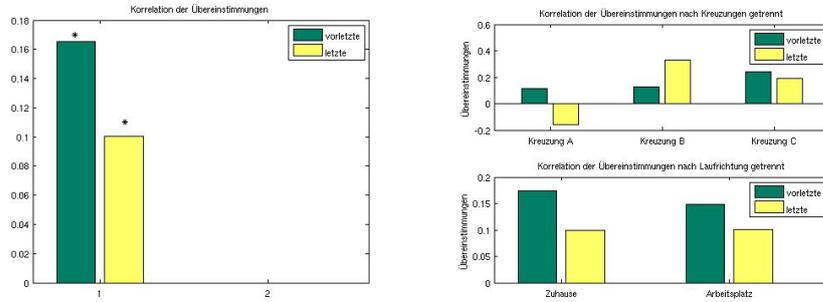


(a) nach Durchgängen getrennt

(b) nach Probanden getrennt

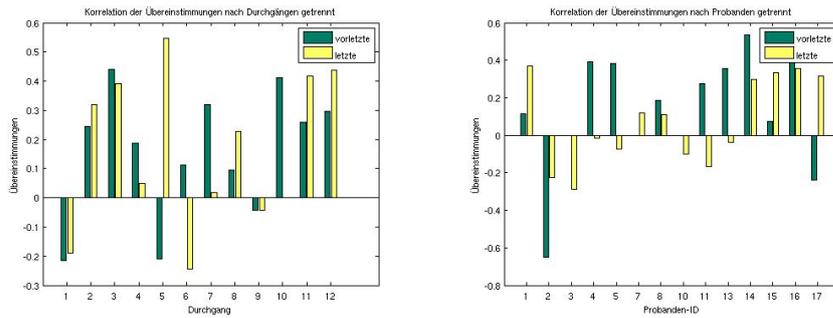
Abbildung 69: Korrelation von Bewegungsentscheidung und Fixationen

### D.5 Korrelation Leinwandseite und Richtungsentscheidung



(a) Korrelation über alle Durchgänge und (b) nach Kreuzung und Laufrichtung getrennt  
 Probanden

Abbildung 70: Korrelation Leinwandseite und Richtungsentscheidung



(a) nach Durchgängen getrennt

(b) nach Probanden getrennt

Abbildung 71: Korrelation Leinwandseite und Richtungsentscheidung

## E Zeitliche Abläufe der Fixationen

Probanden-ID: 1

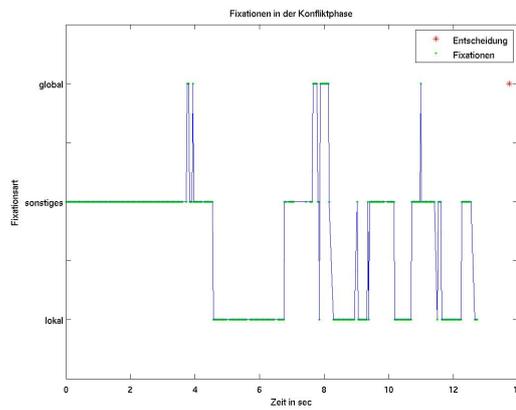


Abbildung 72: Durchgang 1

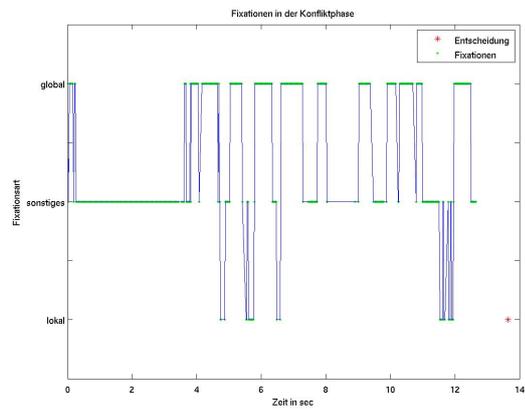


Abbildung 73: Durchgang 2

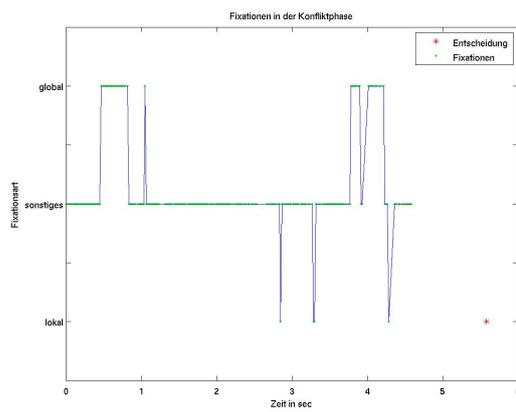


Abbildung 74: Durchgang 3

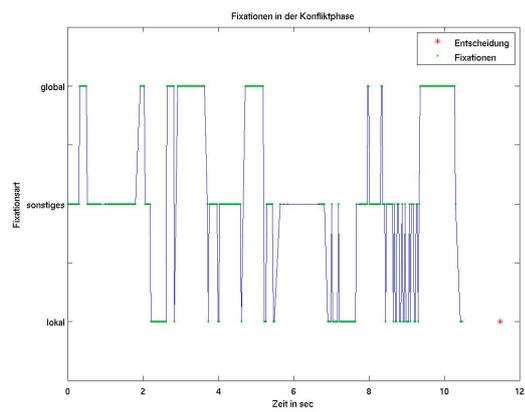


Abbildung 75: Durchgang 4

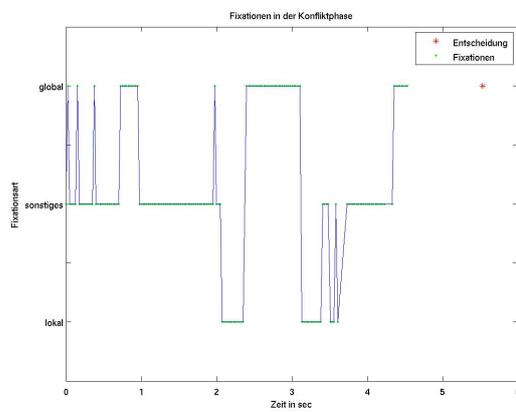


Abbildung 76: Durchgang 5

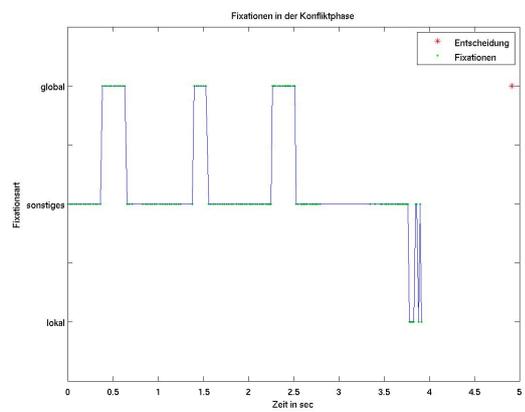


Abbildung 77: Durchgang 6

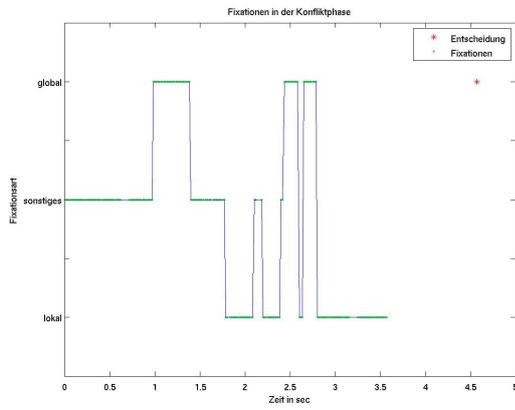


Abbildung 78: Durchgang 7

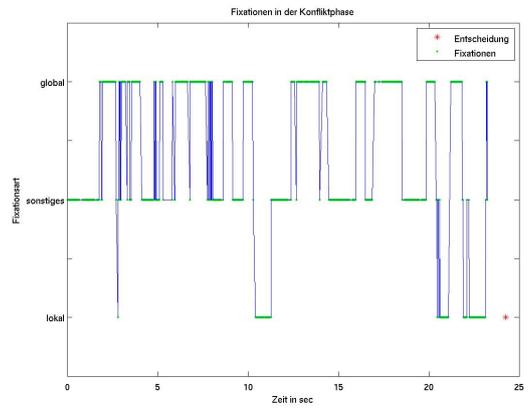


Abbildung 79: Durchgang 8

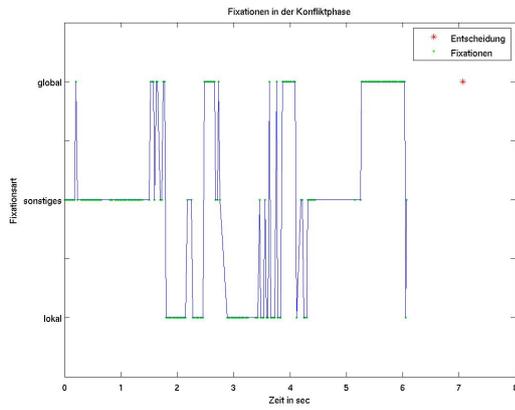


Abbildung 80: Durchgang 9

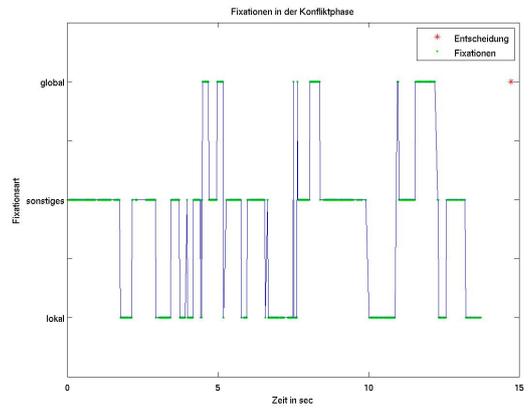


Abbildung 81: Durchgang 10

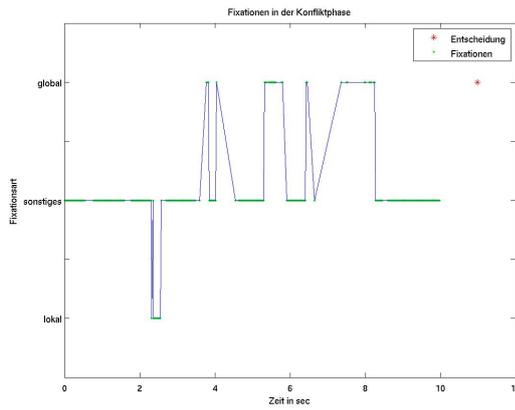


Abbildung 82: Durchgang 11

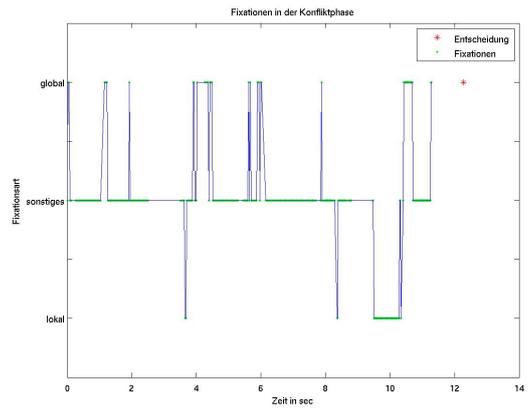


Abbildung 83: Durchgang 12

Probanden-ID: 2

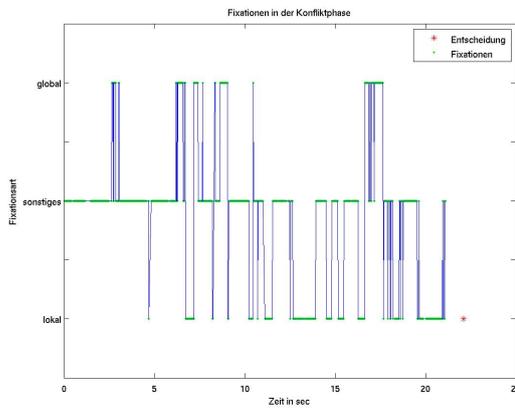


Abbildung 84: Durchgang 1

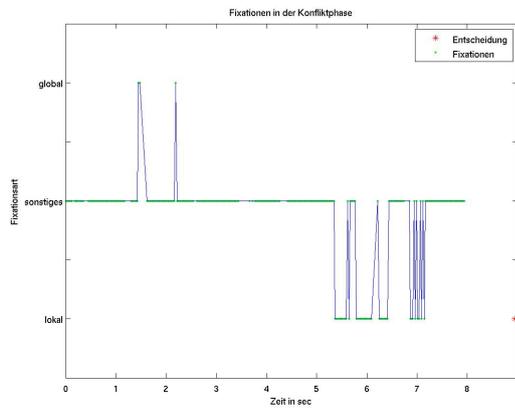


Abbildung 85: Durchgang 2

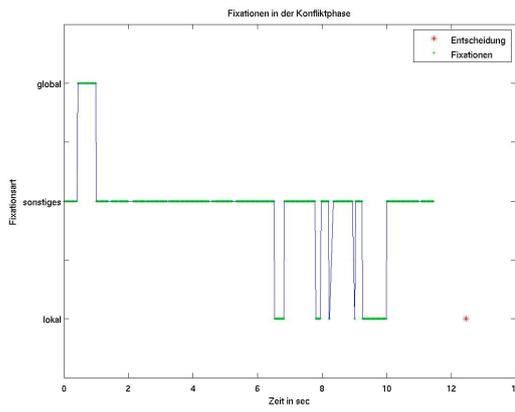


Abbildung 86: Durchgang 3

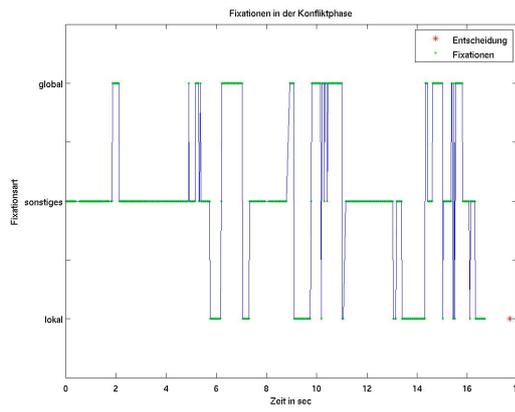


Abbildung 87: Durchgang 4

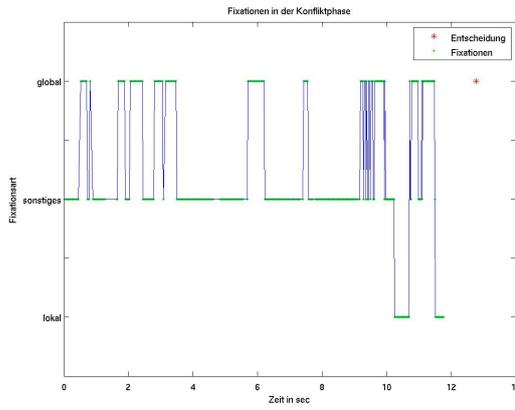


Abbildung 88: Durchgang 5

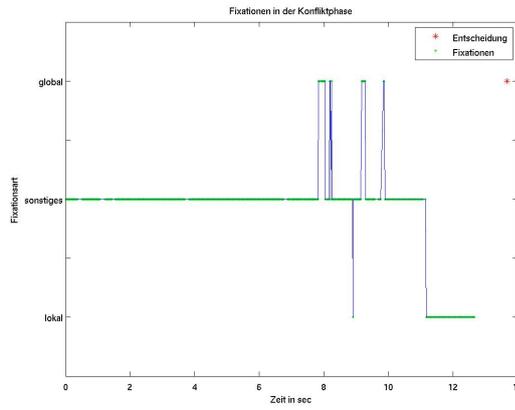


Abbildung 89: Durchgang 6

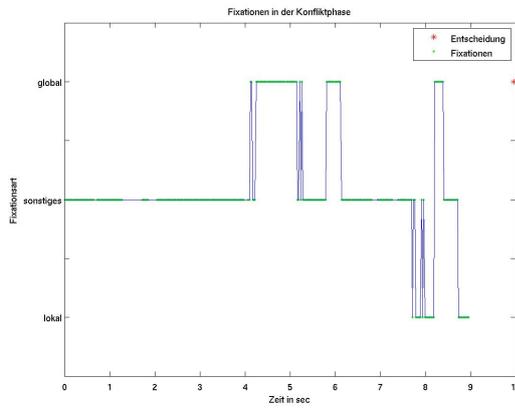


Abbildung 90: Durchgang 7

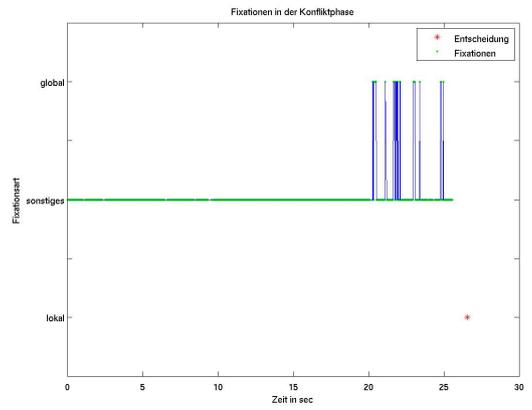


Abbildung 91: Durchgang 8

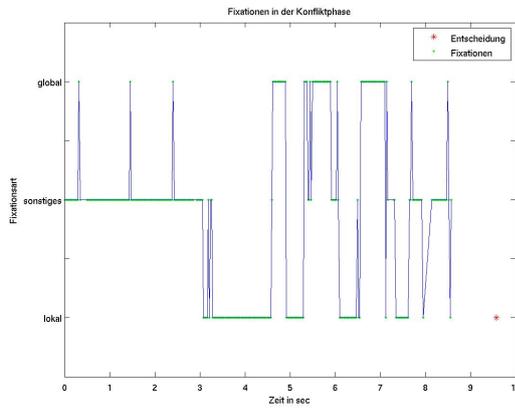


Abbildung 92: Durchgang 9

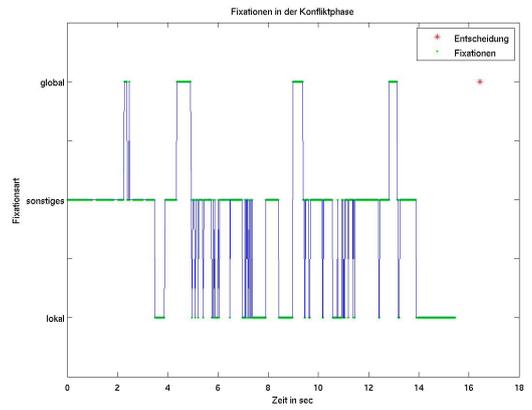


Abbildung 93: Durchgang 10

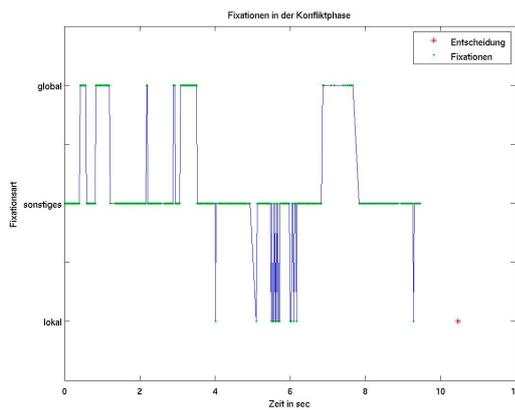


Abbildung 94: Durchgang 11

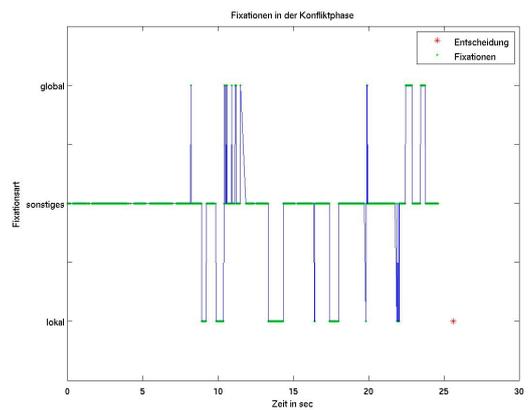


Abbildung 95: Durchgang 12

Probanden-ID: 3

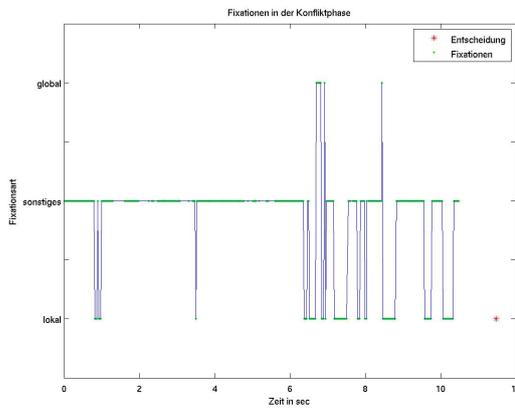


Abbildung 96: Durchgang 1

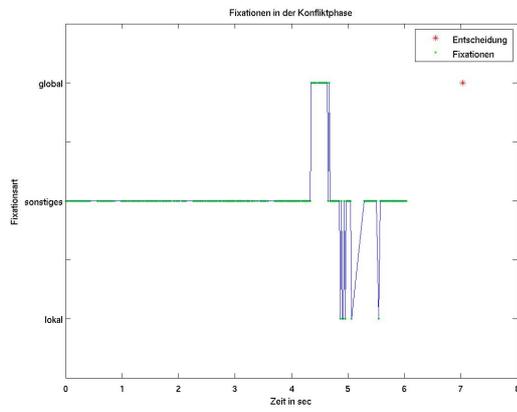


Abbildung 97: Durchgang 2

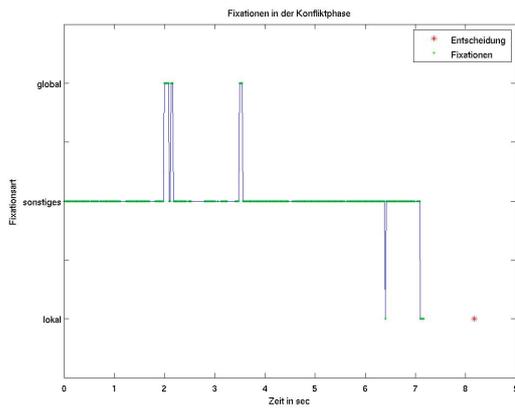


Abbildung 98: Durchgang 3

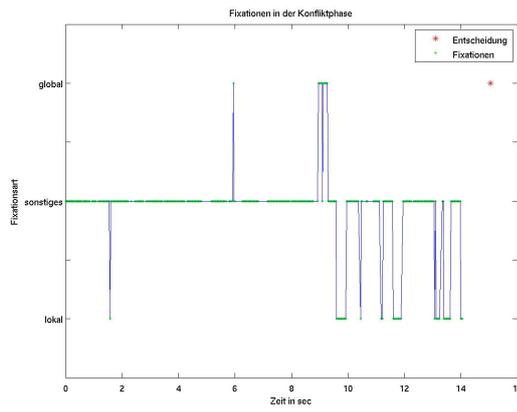


Abbildung 99: Durchgang 4

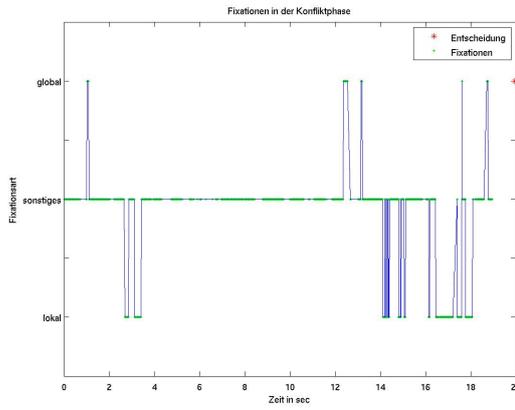


Abbildung 100: Durchgang 5

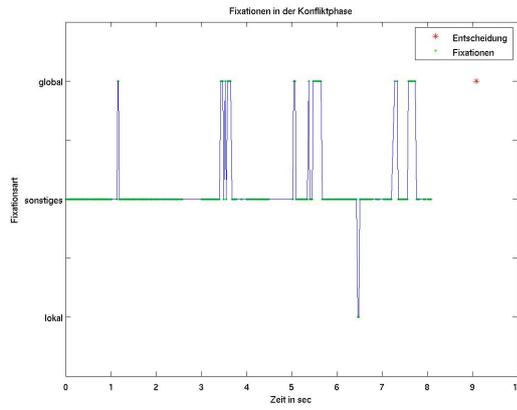


Abbildung 101: Durchgang 6

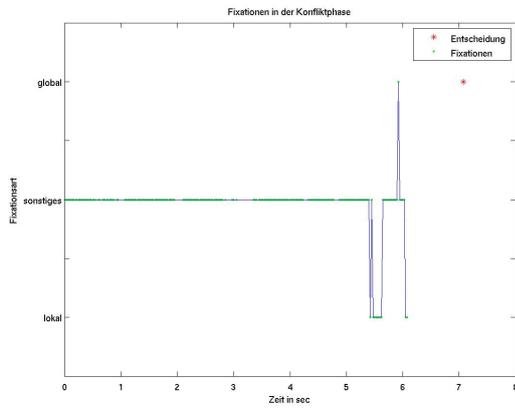


Abbildung 102: Durchgang 7

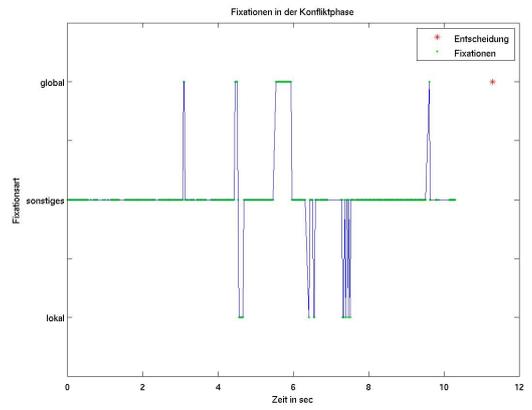


Abbildung 103: Durchgang 8

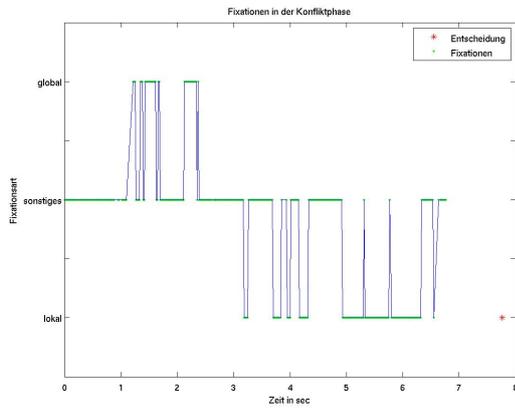


Abbildung 104: Durchgang 9

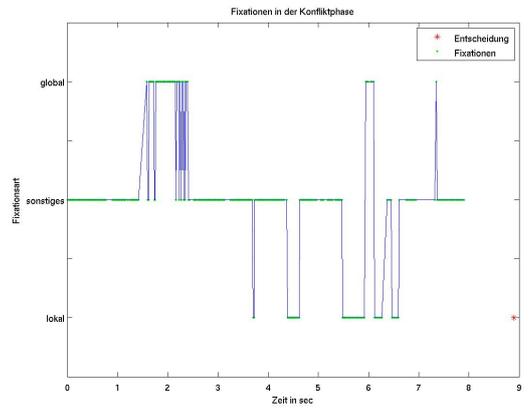


Abbildung 105: Durchgang 10

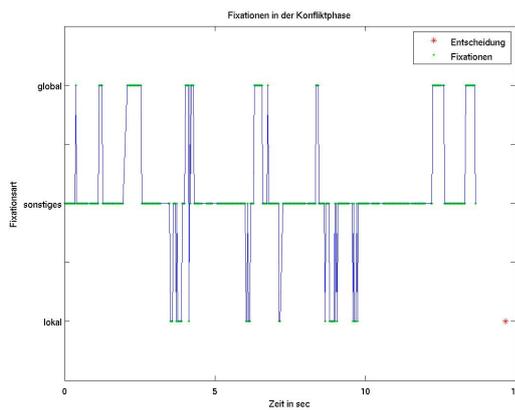


Abbildung 106: Durchgang 11

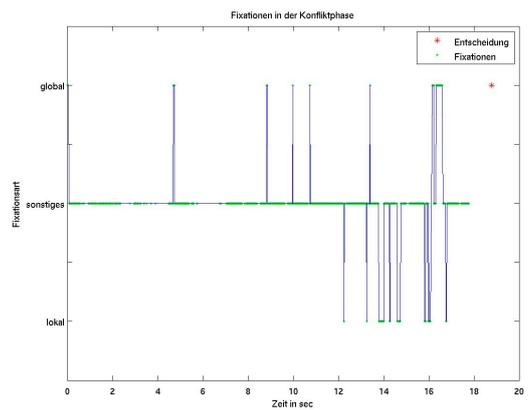


Abbildung 107: Durchgang 12

Probanden-ID: 4

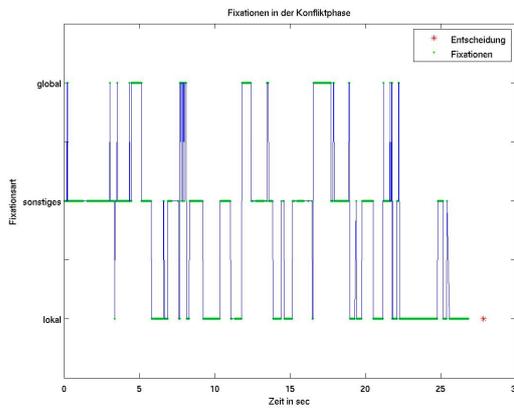


Abbildung 108: Durchgang 1

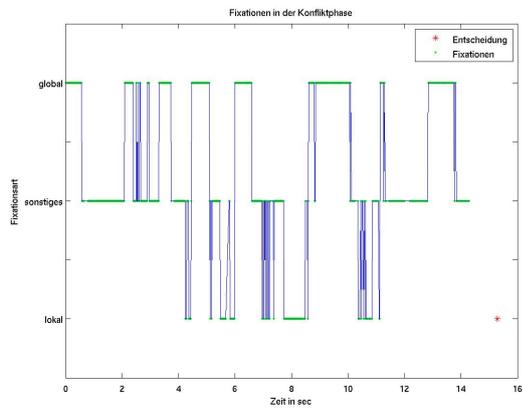


Abbildung 109: Durchgang 2

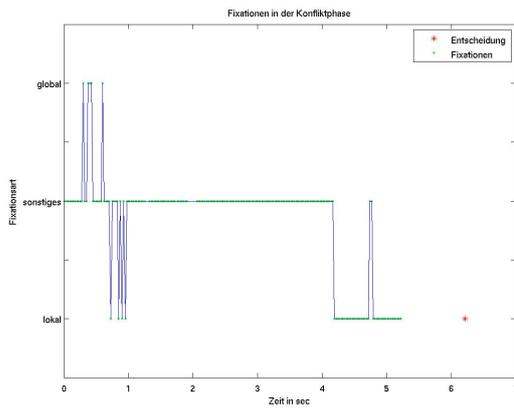


Abbildung 110: Durchgang 3

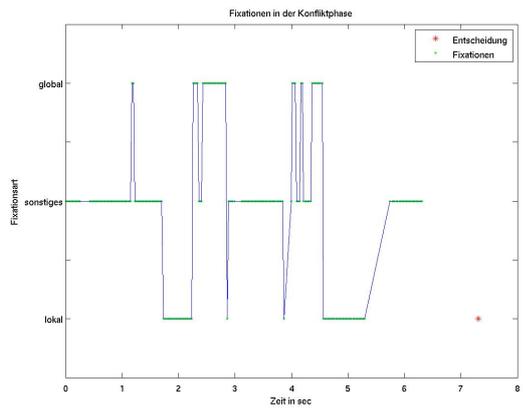


Abbildung 111: Durchgang 4

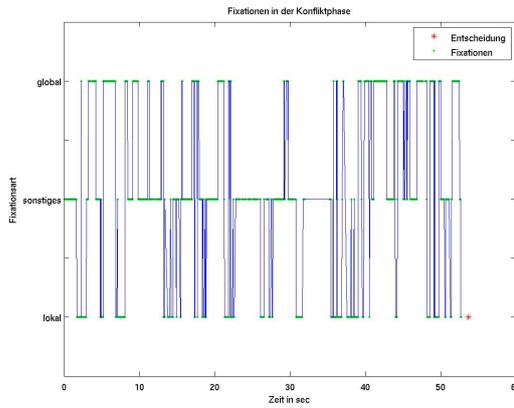


Abbildung 112: Durchgang 5

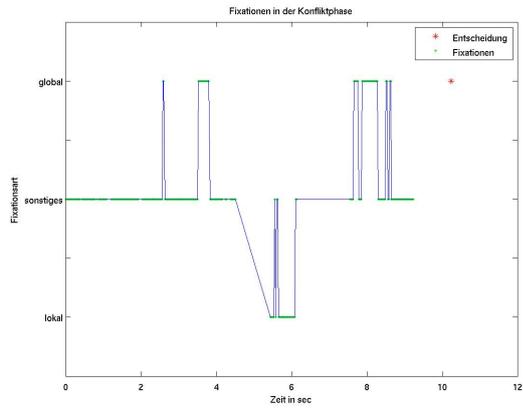


Abbildung 113: Durchgang 6

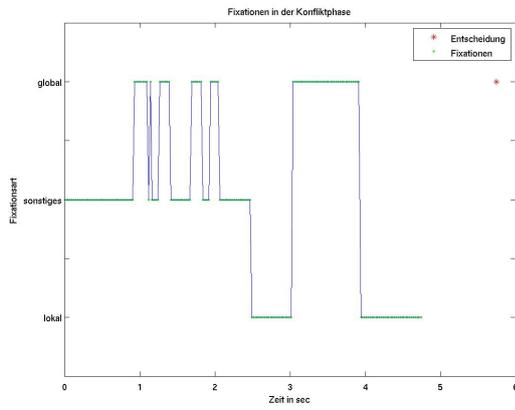


Abbildung 114: Durchgang 7

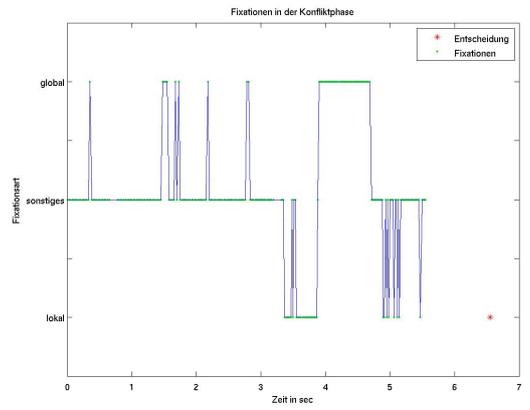


Abbildung 115: Durchgang 8

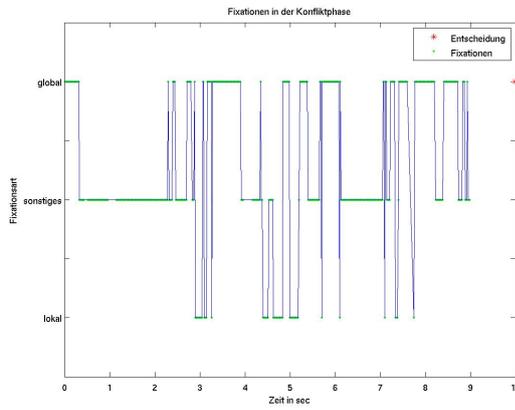


Abbildung 116: Durchgang 9

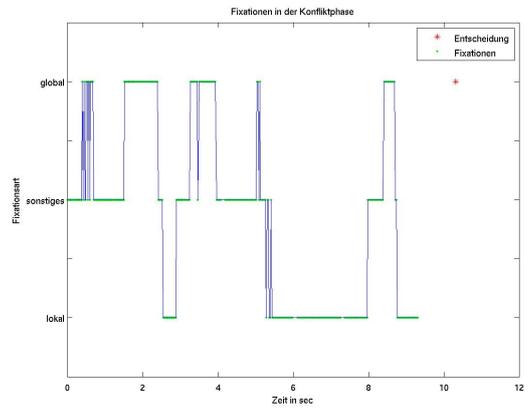


Abbildung 117: Durchgang 10

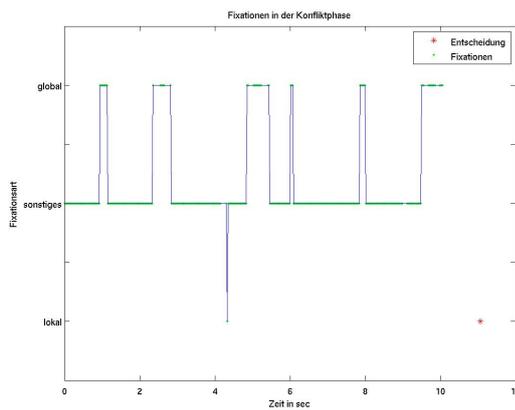


Abbildung 118: Durchgang 11

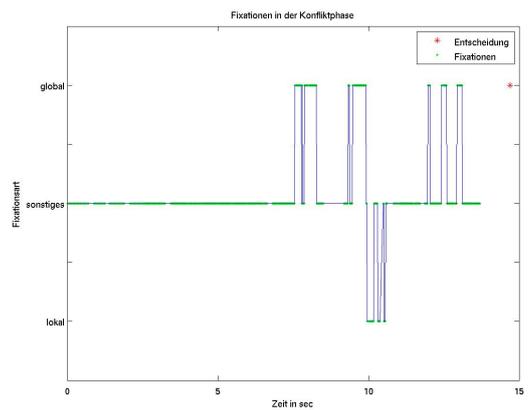


Abbildung 119: Durchgang 12

Probanden-ID: 5

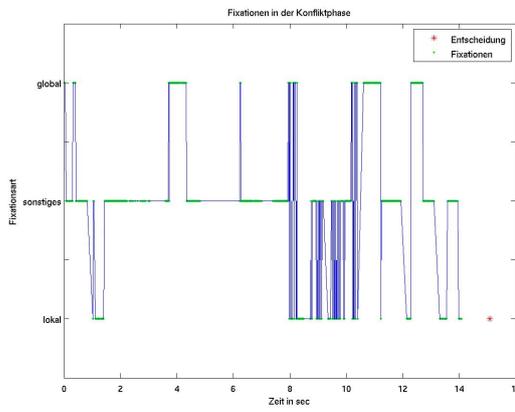


Abbildung 120: Durchgang 1

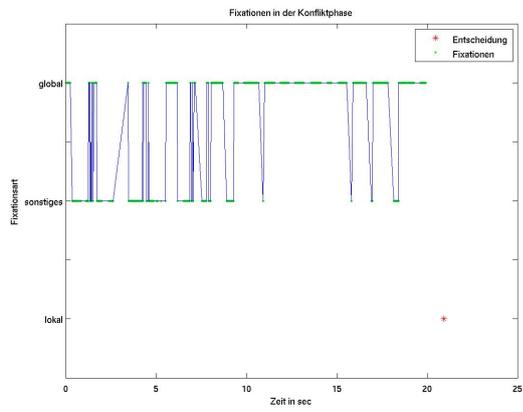


Abbildung 121: Durchgang 2

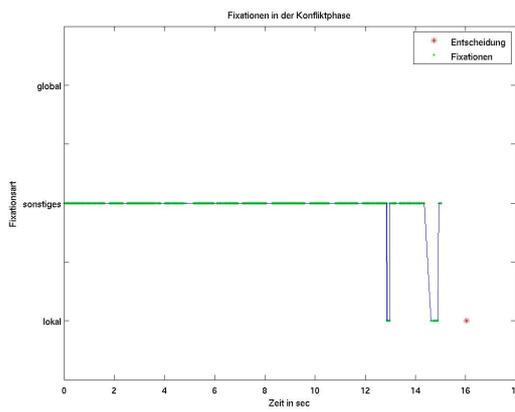


Abbildung 122: Durchgang 3

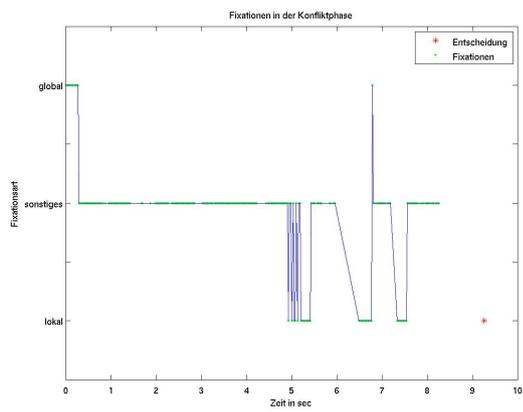


Abbildung 123: Durchgang 4

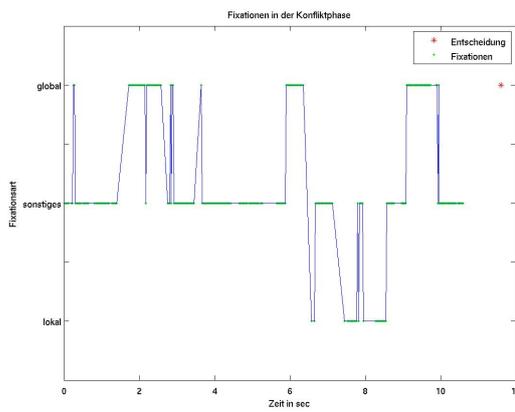


Abbildung 124: Durchgang 5

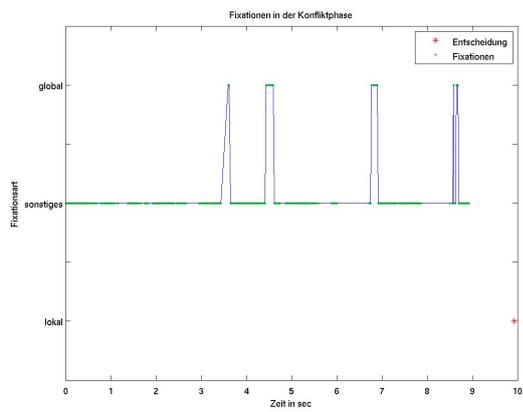


Abbildung 125: Durchgang 6

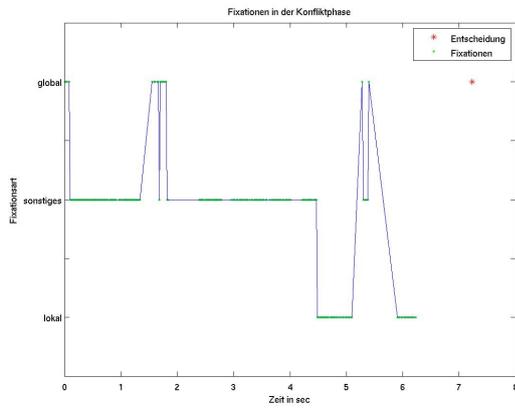


Abbildung 126: Durchgang 7

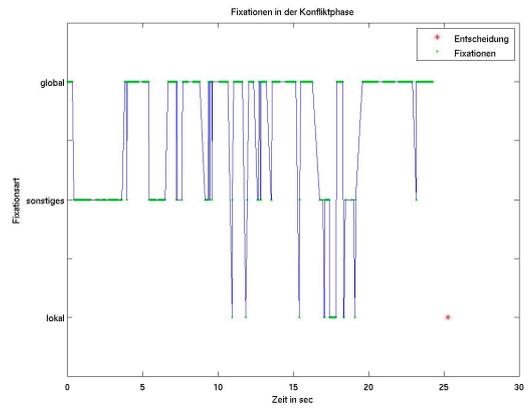


Abbildung 127: Durchgang 8

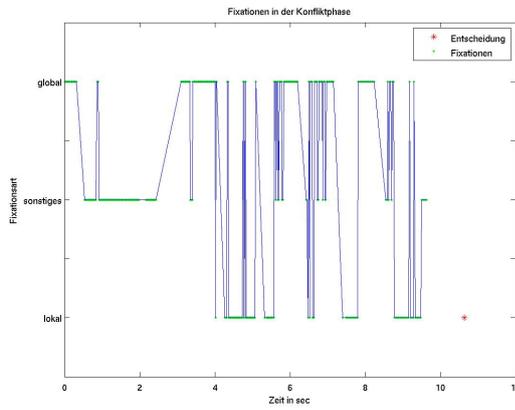


Abbildung 128: Durchgang 9

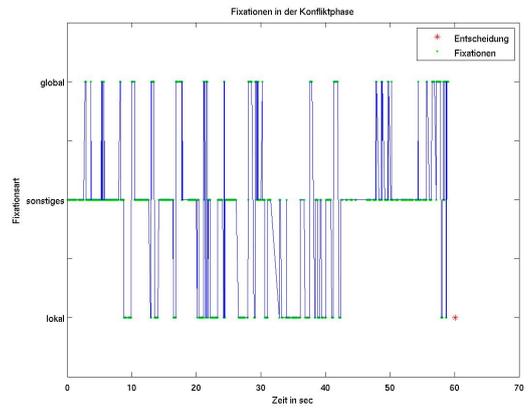


Abbildung 129: Durchgang 10

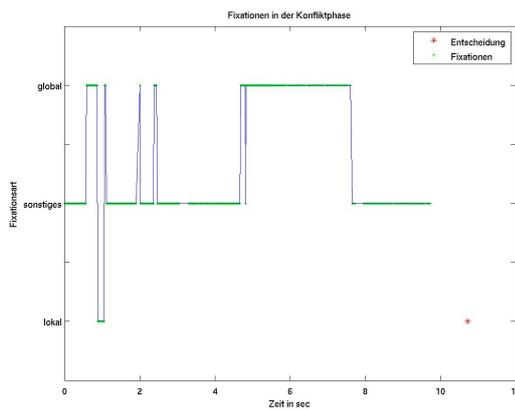


Abbildung 130: Durchgang 11

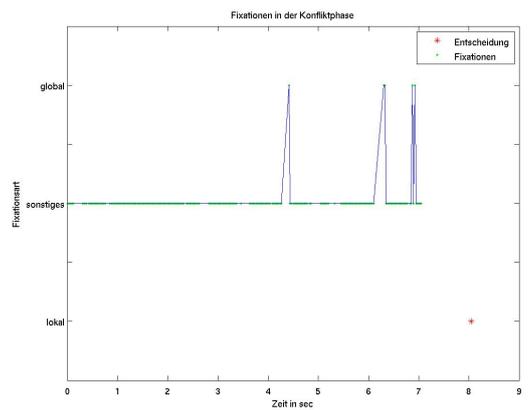


Abbildung 131: Durchgang 12

Probanden-ID: 7

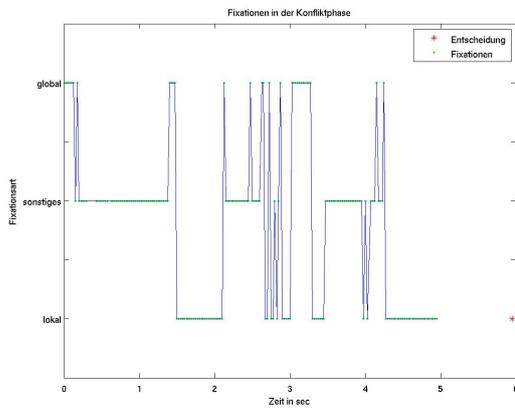


Abbildung 132: Durchgang 1

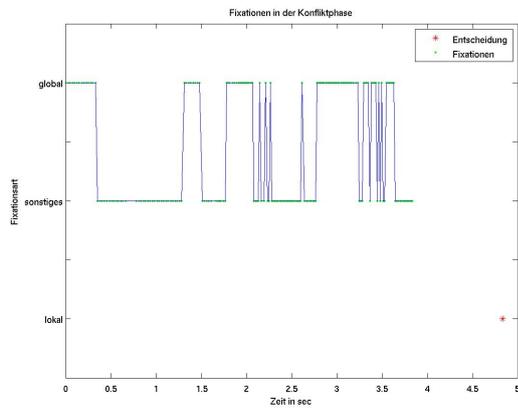


Abbildung 133: Durchgang 2

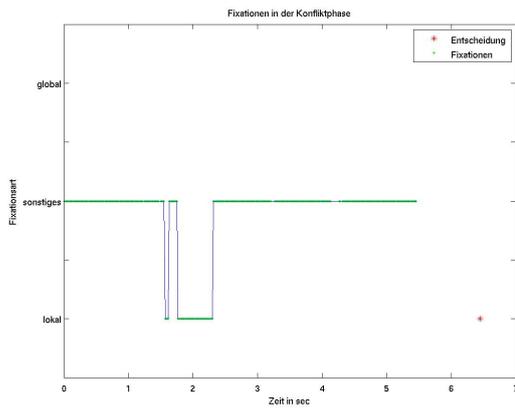


Abbildung 134: Durchgang 3

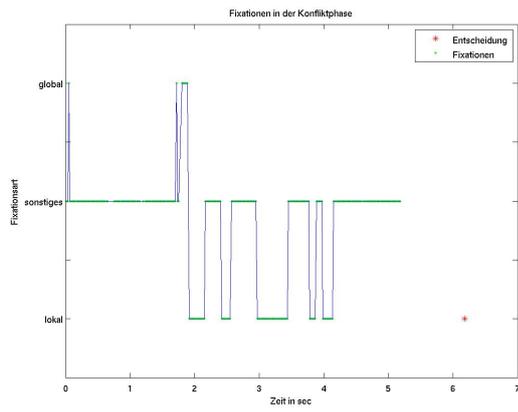


Abbildung 135: Durchgang 4

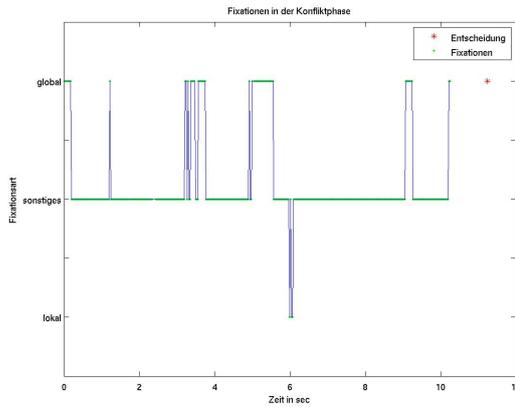


Abbildung 136: Durchgang 5

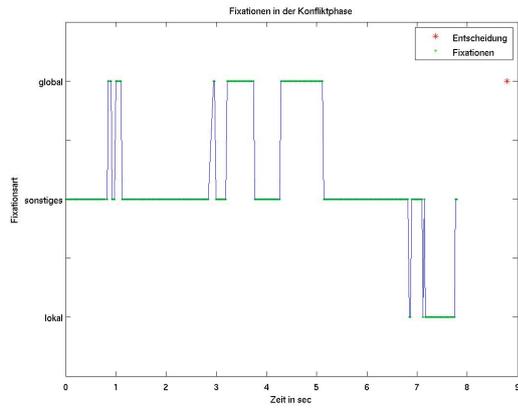


Abbildung 137: Durchgang 6

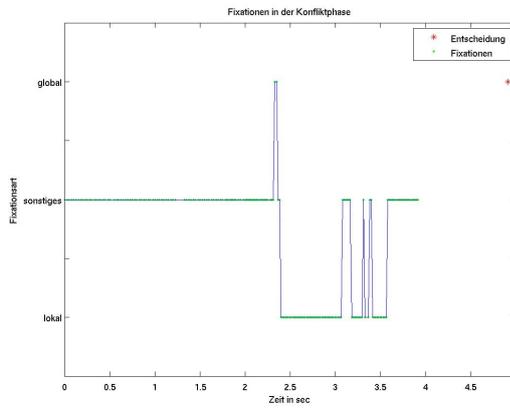


Abbildung 138: Durchgang 7

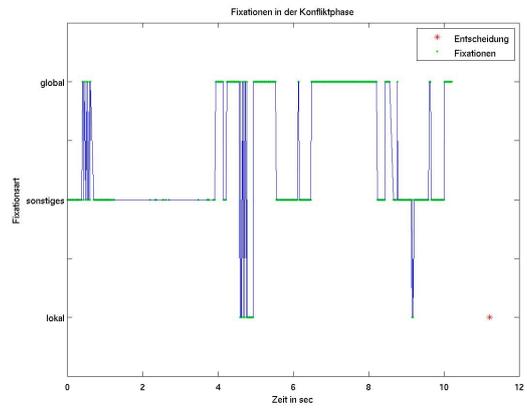


Abbildung 139: Durchgang 8

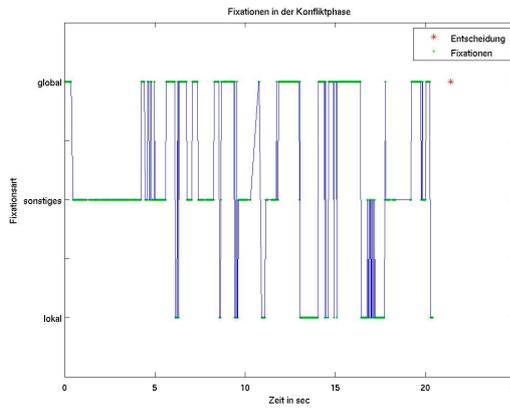


Abbildung 140: Durchgang 9

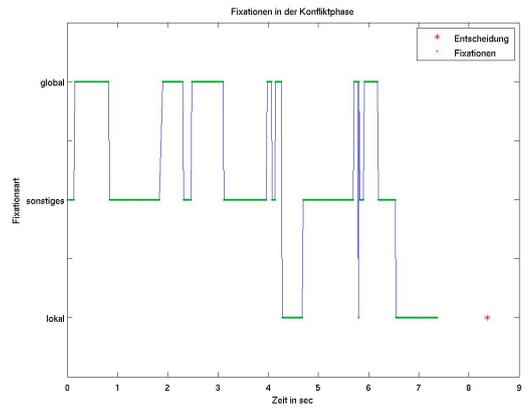


Abbildung 141: Durchgang 10

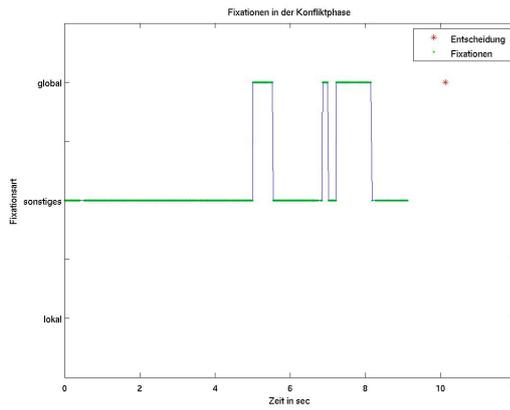


Abbildung 142: Durchgang 11

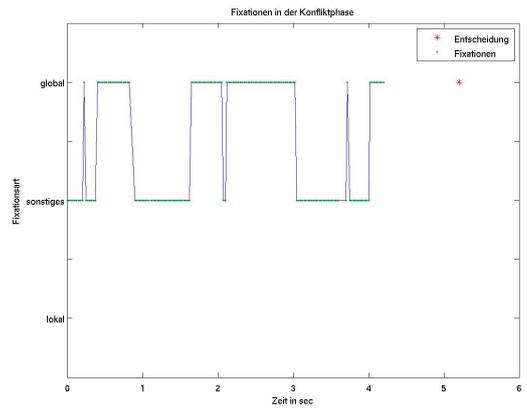


Abbildung 143: Durchgang 12

Probanden-ID: 8

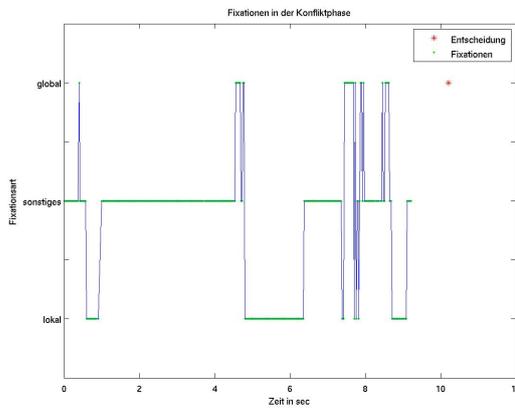


Abbildung 144: Durchgang 1

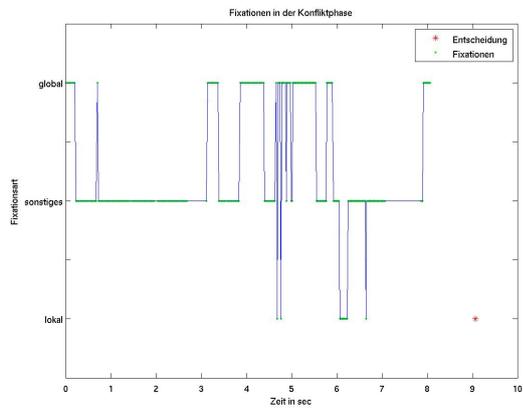


Abbildung 145: Durchgang 2

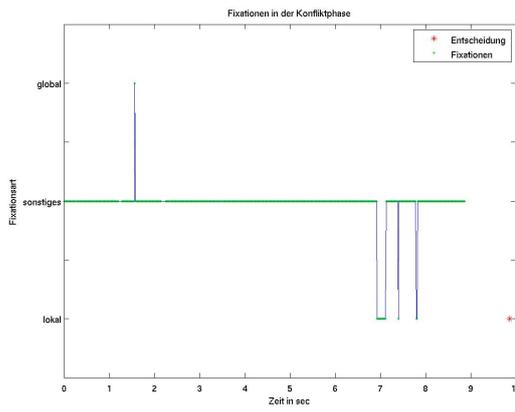


Abbildung 146: Durchgang 3

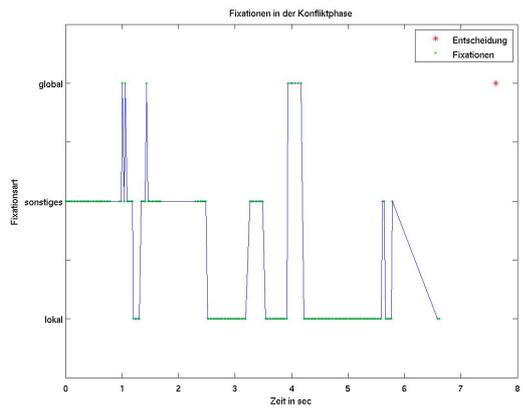


Abbildung 147: Durchgang 4

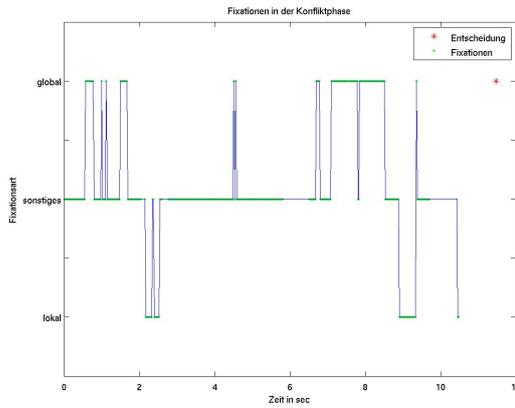


Abbildung 148: Durchgang 5

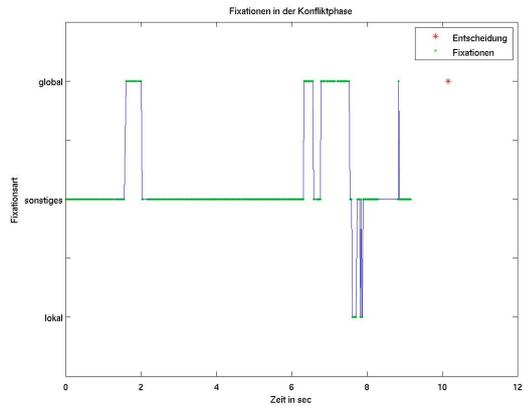


Abbildung 149: Durchgang 6

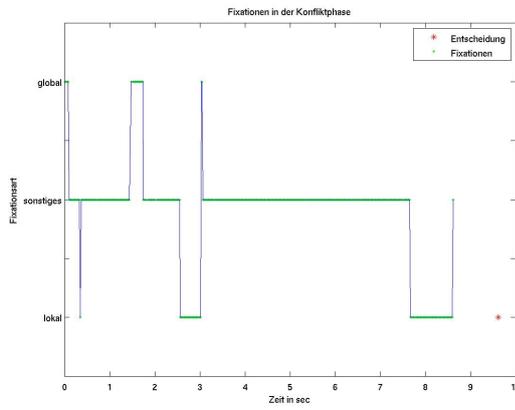


Abbildung 150: Durchgang 7

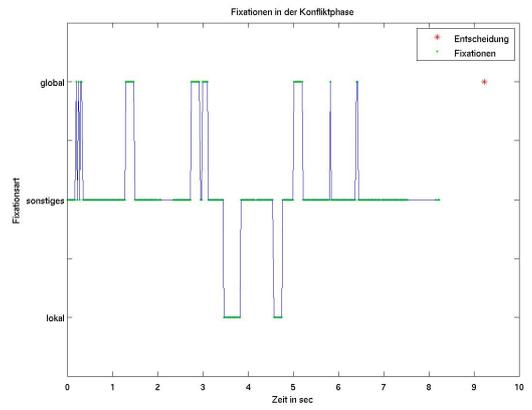


Abbildung 151: Durchgang 8

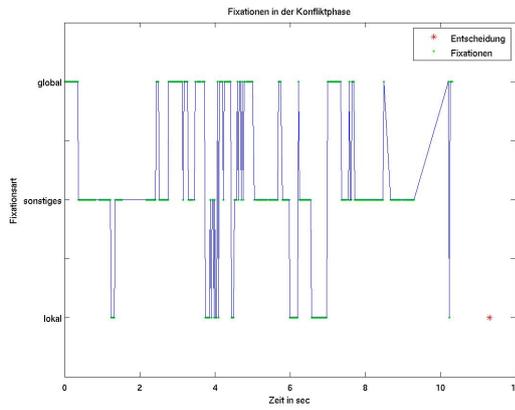


Abbildung 152: Durchgang 9

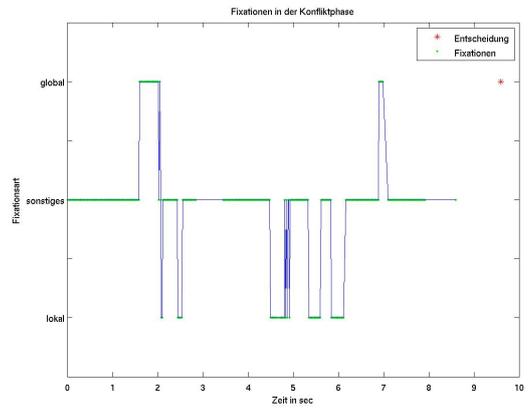


Abbildung 153: Durchgang 10

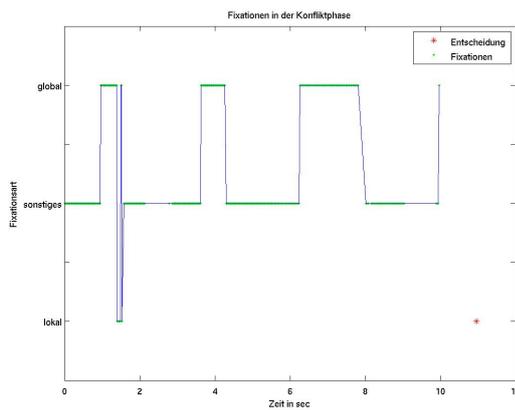


Abbildung 154: Durchgang 11

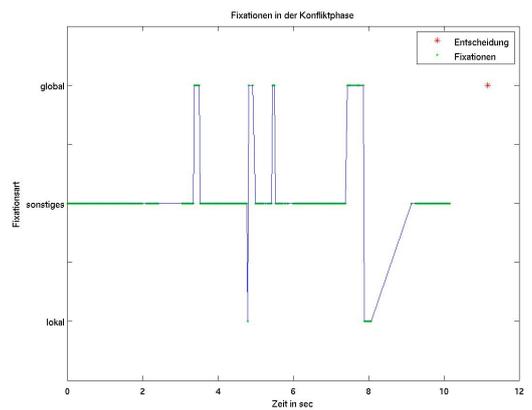


Abbildung 155: Durchgang 12

Probanden-ID: 10

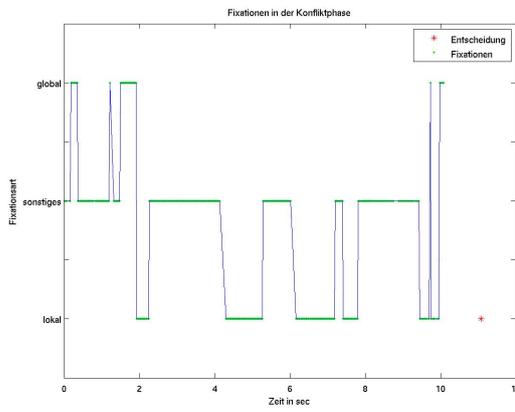


Abbildung 156: Durchgang 1

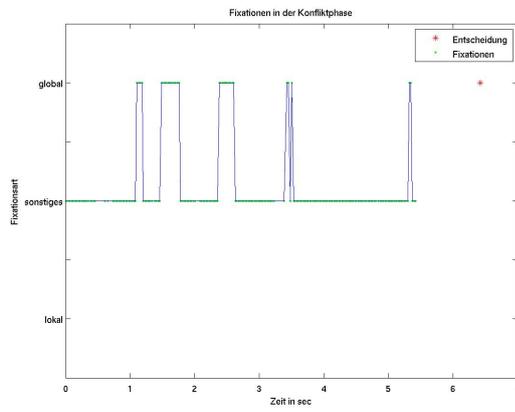


Abbildung 157: Durchgang 2

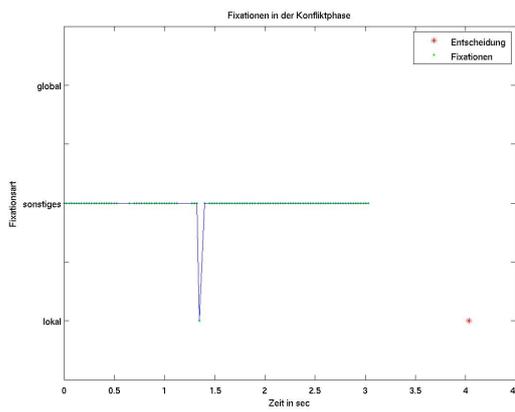


Abbildung 158: Durchgang 3

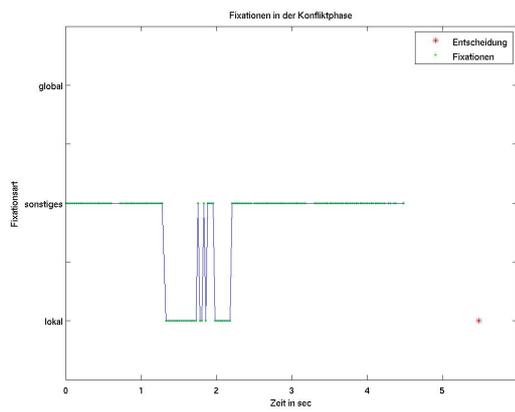


Abbildung 159: Durchgang 4

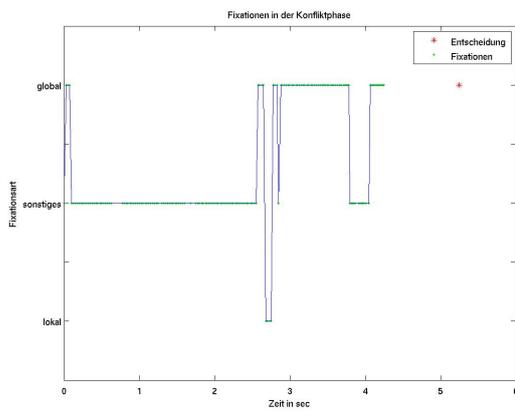


Abbildung 160: Durchgang 5

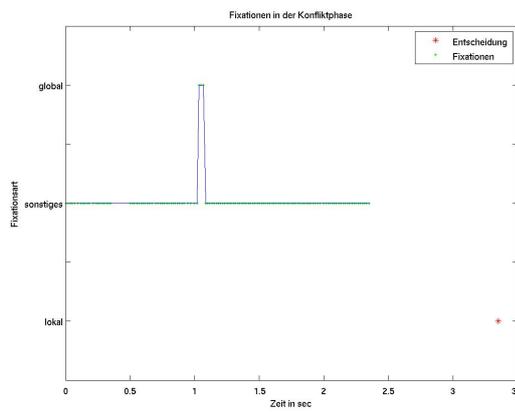


Abbildung 161: Durchgang 6

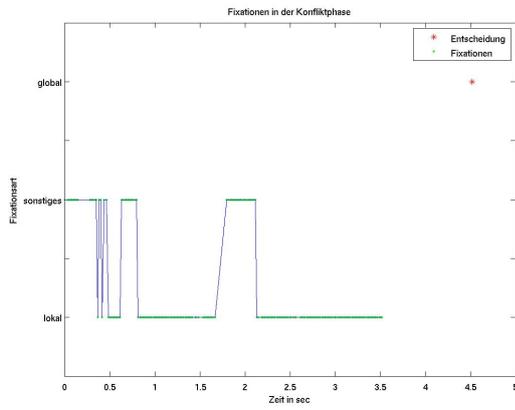


Abbildung 162: Durchgang 7

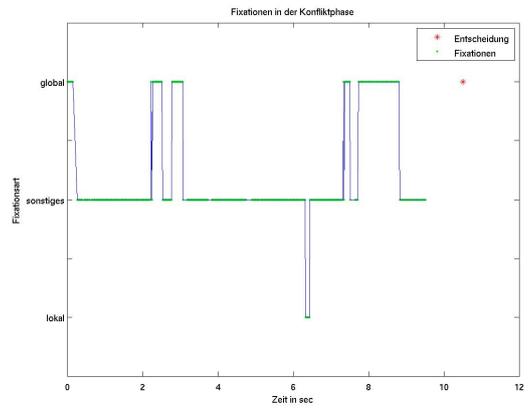


Abbildung 163: Durchgang 8

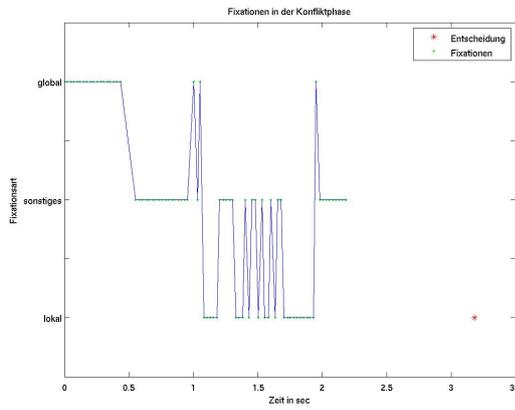


Abbildung 164: Durchgang 9

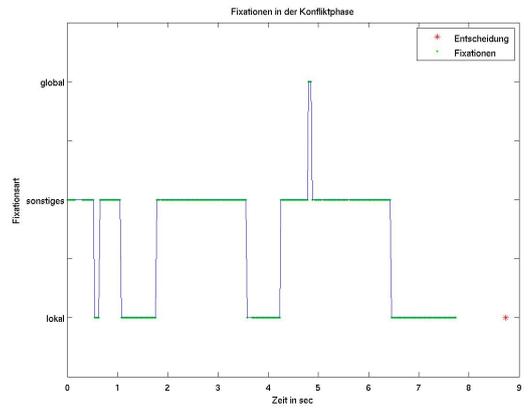


Abbildung 165: Durchgang 10

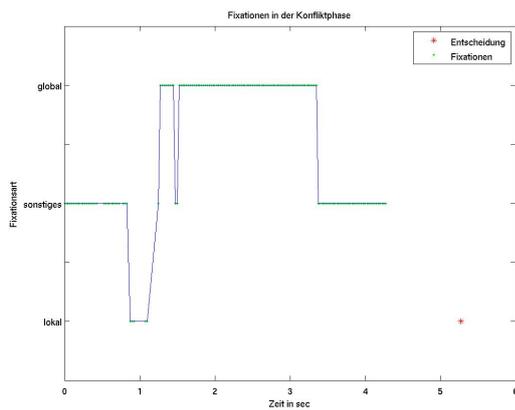


Abbildung 166: Durchgang 11

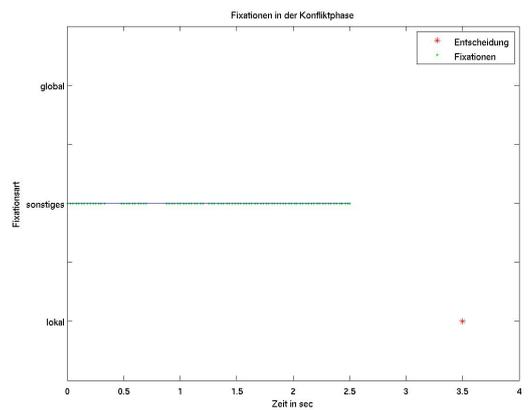


Abbildung 167: Durchgang 12

Probanden-ID: 11

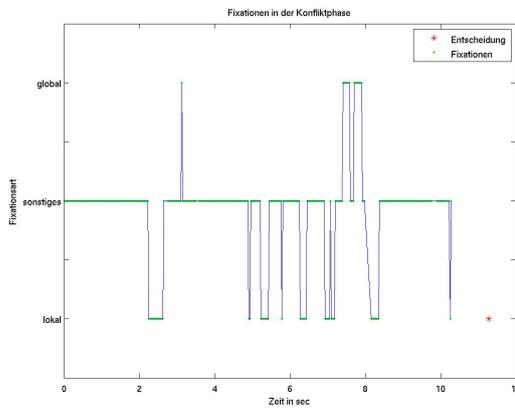


Abbildung 168: Durchgang 1

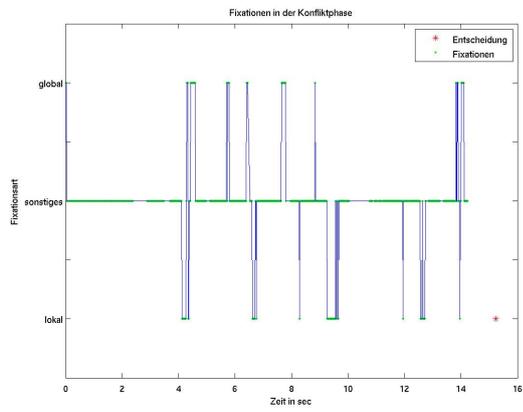


Abbildung 169: Durchgang 2

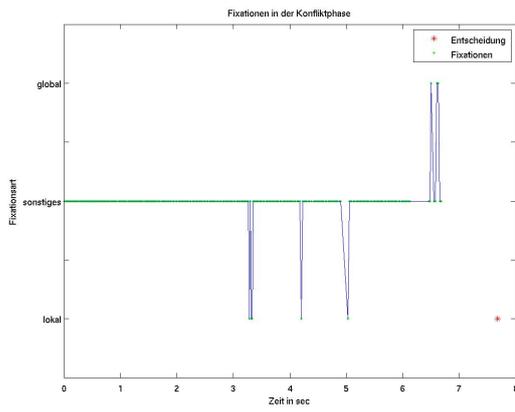


Abbildung 170: Durchgang 3

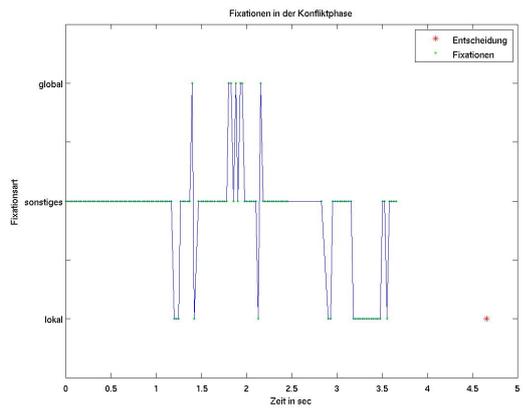


Abbildung 171: Durchgang 4

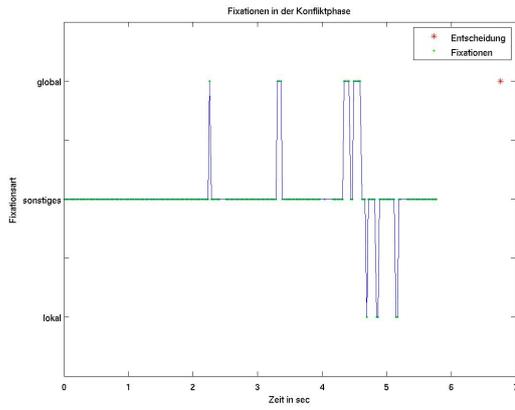


Abbildung 172: Durchgang 5

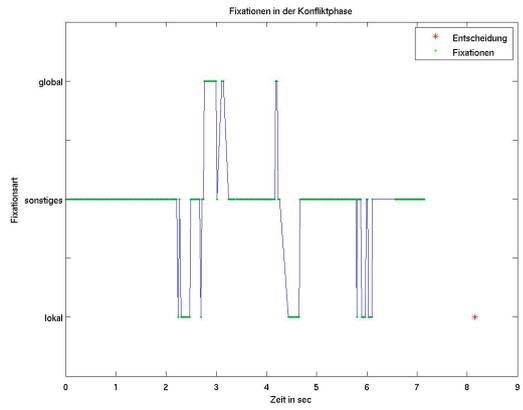


Abbildung 173: Durchgang 6

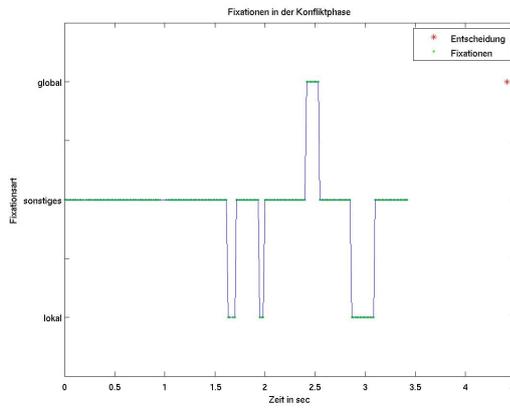


Abbildung 174: Durchgang 7

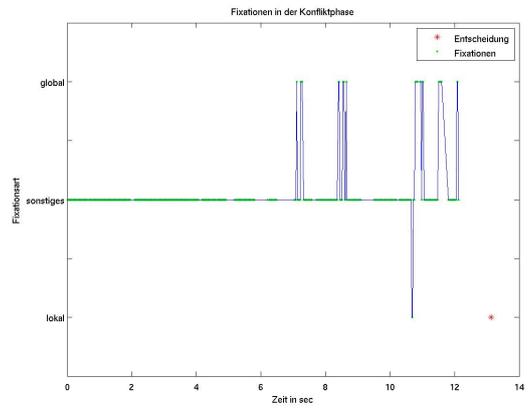


Abbildung 175: Durchgang 8

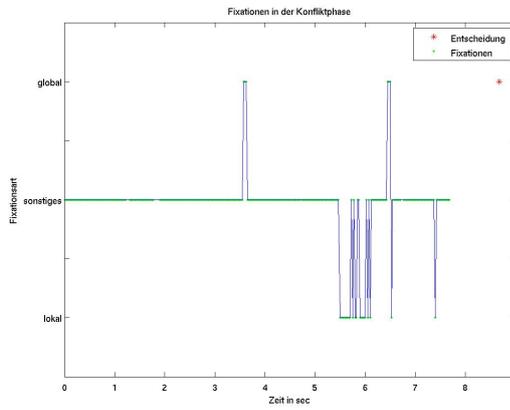


Abbildung 176: Durchgang 9

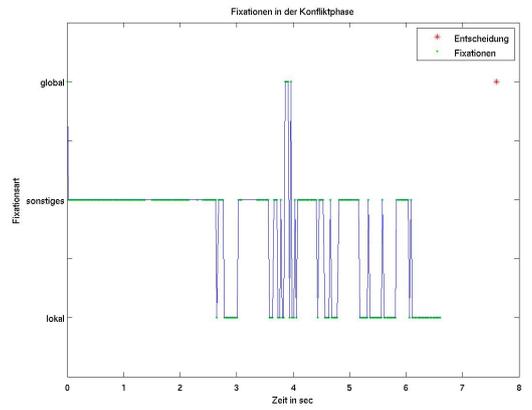


Abbildung 177: Durchgang 10

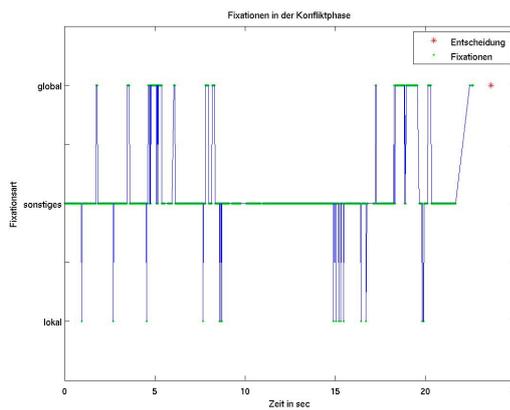


Abbildung 178: Durchgang 11

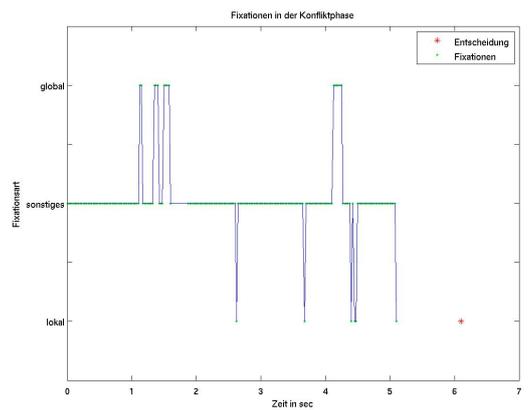


Abbildung 179: Durchgang 12

Probanden-ID: 13

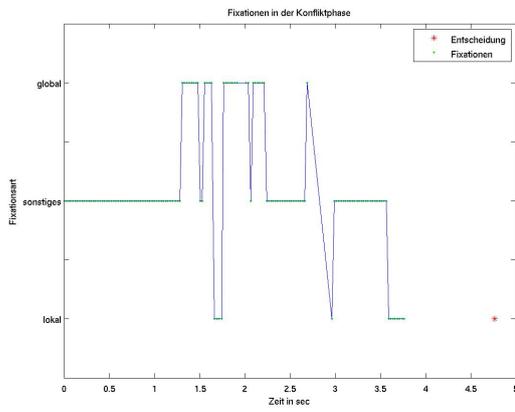


Abbildung 180: Durchgang 1

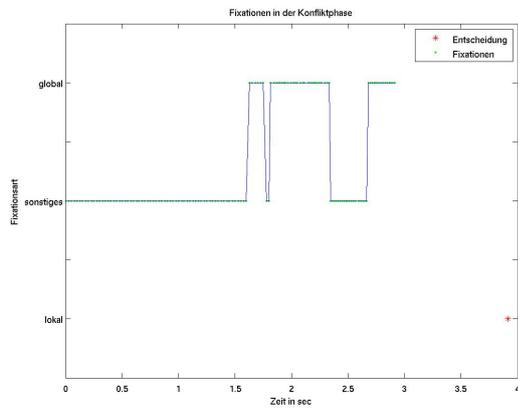


Abbildung 181: Durchgang 2

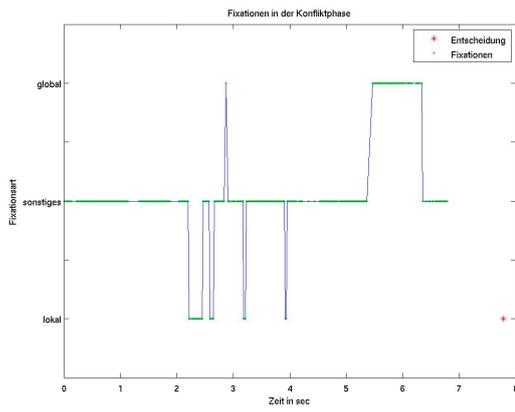


Abbildung 182: Durchgang 3

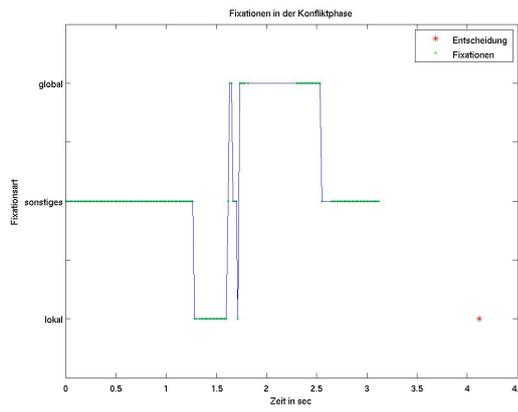


Abbildung 183: Durchgang 4

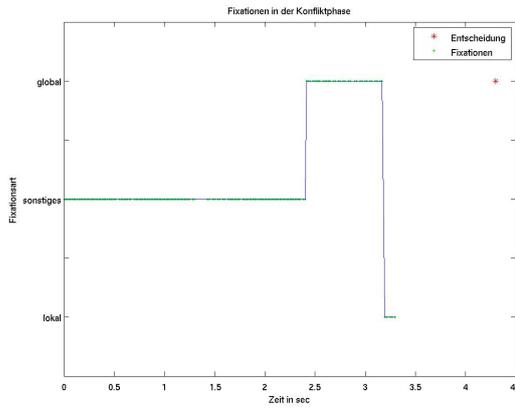


Abbildung 184: Durchgang 5

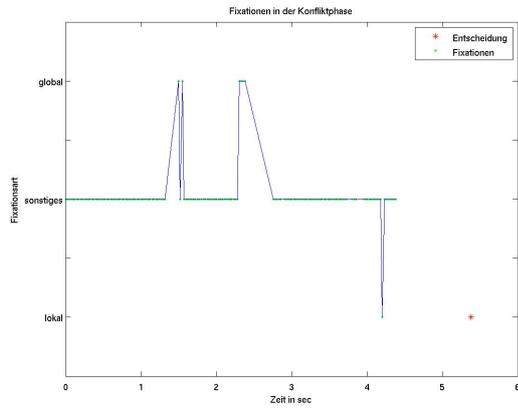


Abbildung 185: Durchgang 6

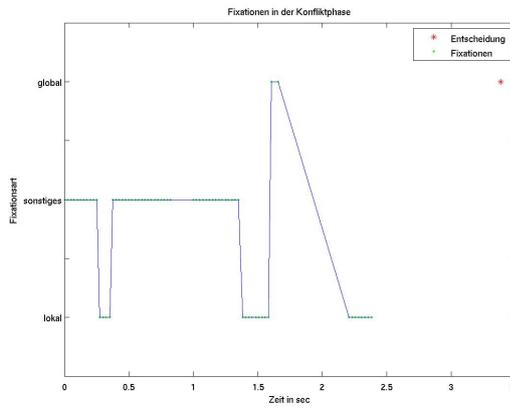


Abbildung 186: Durchgang 7

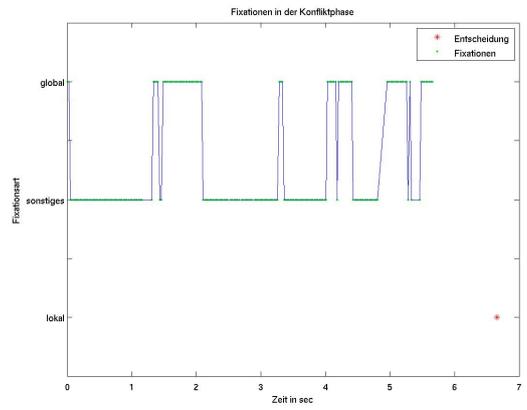


Abbildung 187: Durchgang 8

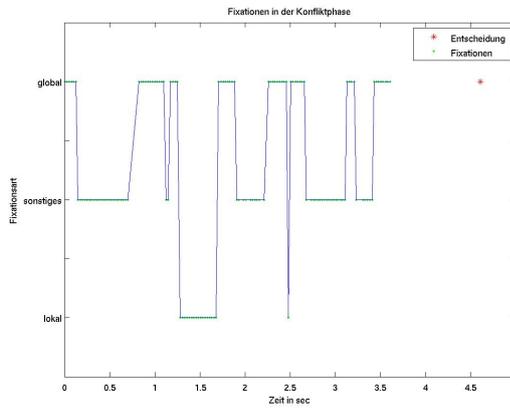


Abbildung 188: Durchgang 9

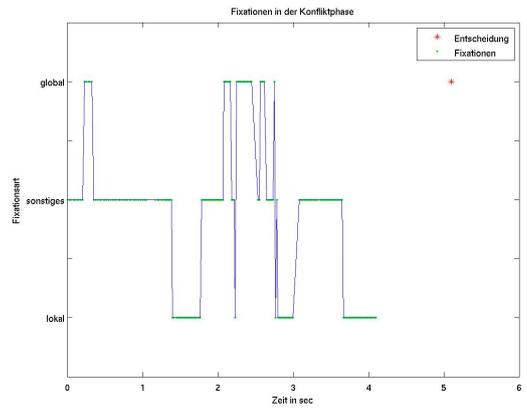


Abbildung 189: Durchgang 10

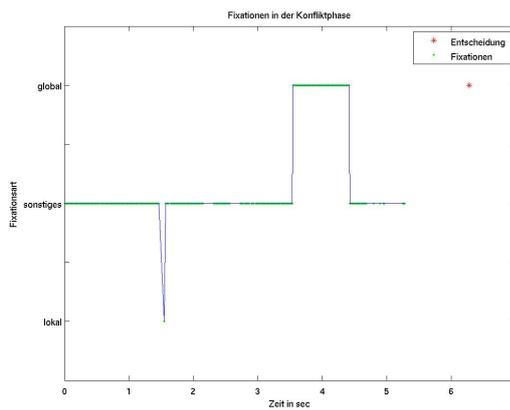


Abbildung 190: Durchgang 11

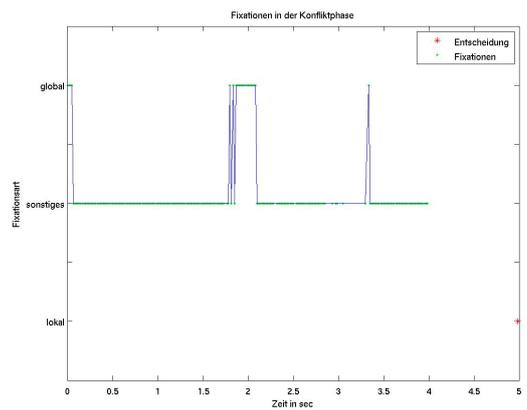


Abbildung 191: Durchgang 12

Probanden-ID: 14

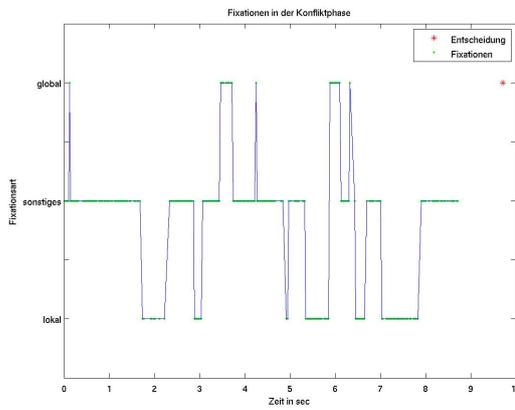


Abbildung 192: Durchgang 1

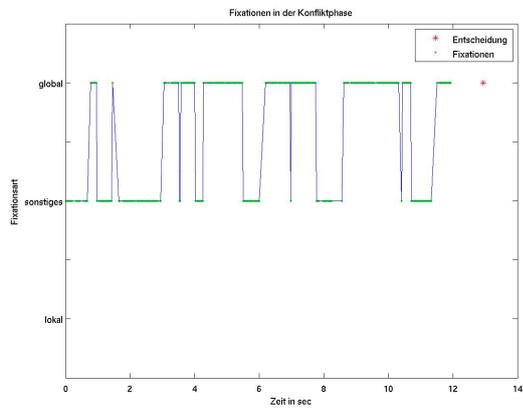


Abbildung 193: Durchgang 2

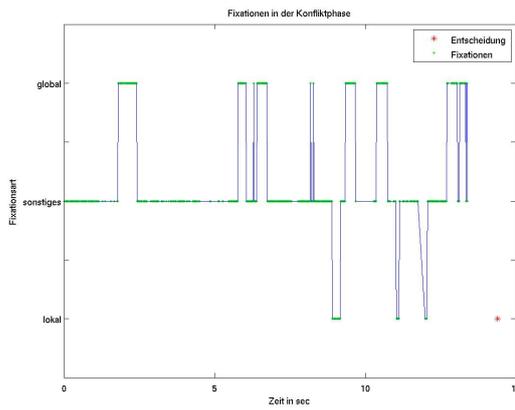


Abbildung 194: Durchgang 3

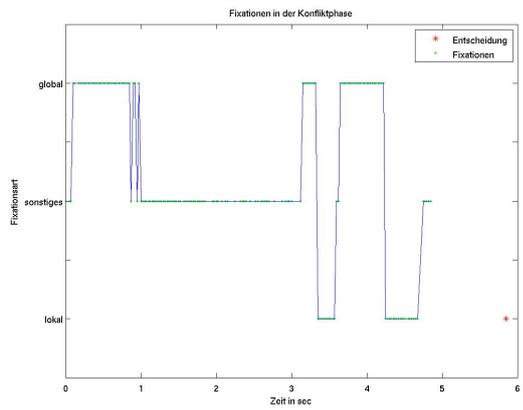


Abbildung 195: Durchgang 4

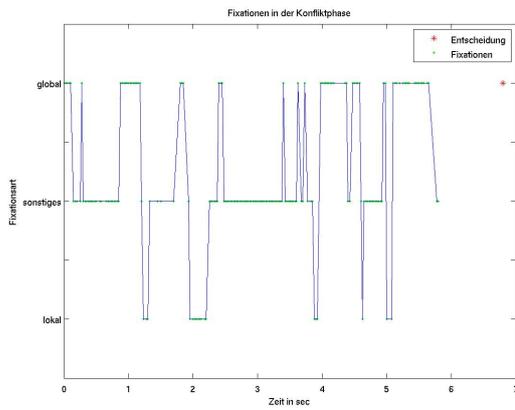


Abbildung 196: Durchgang 5

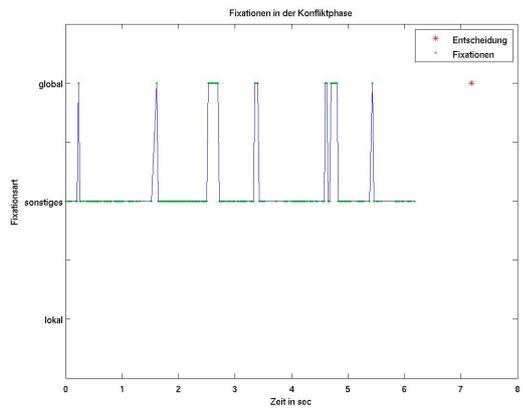


Abbildung 197: Durchgang 6

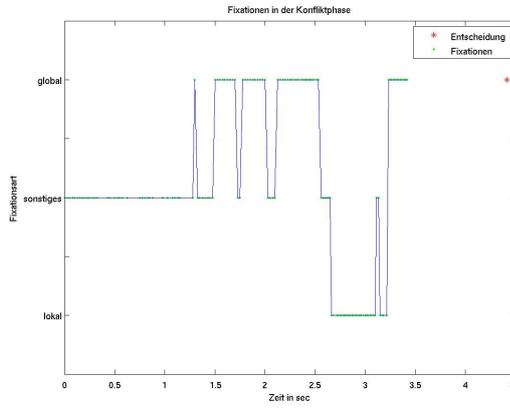


Abbildung 198: Durchgang 7

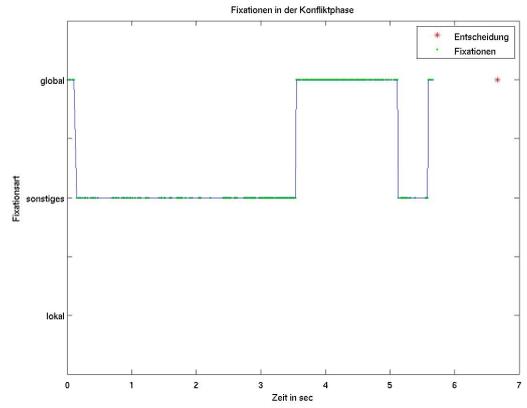


Abbildung 199: Durchgang 8

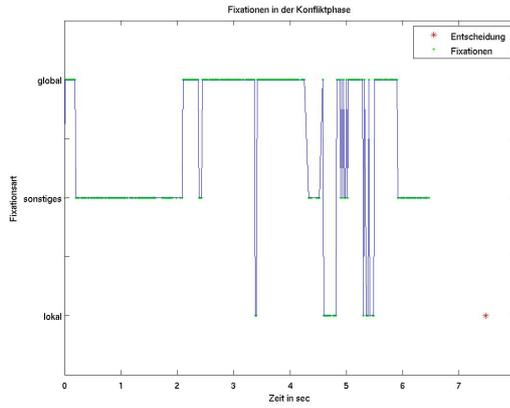


Abbildung 200: Durchgang 9

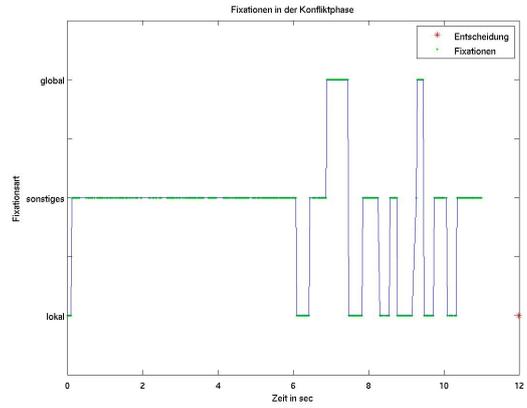


Abbildung 201: Durchgang 10

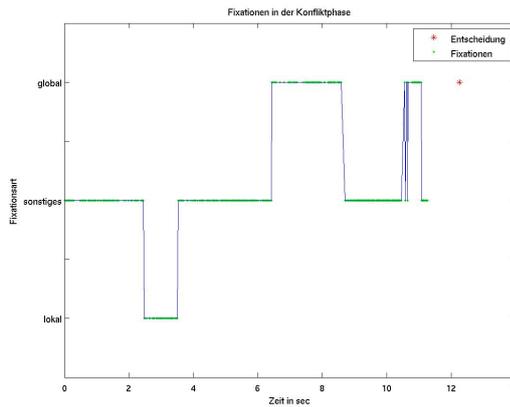


Abbildung 202: Durchgang 11

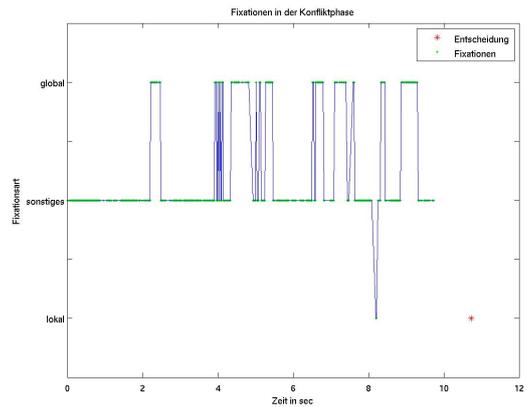


Abbildung 203: Durchgang 12

Probanden-ID: 15

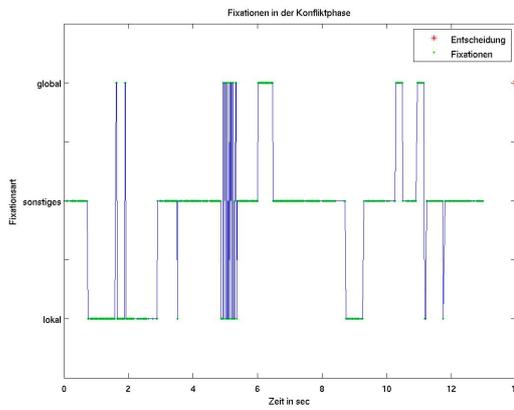


Abbildung 204: Durchgang 1

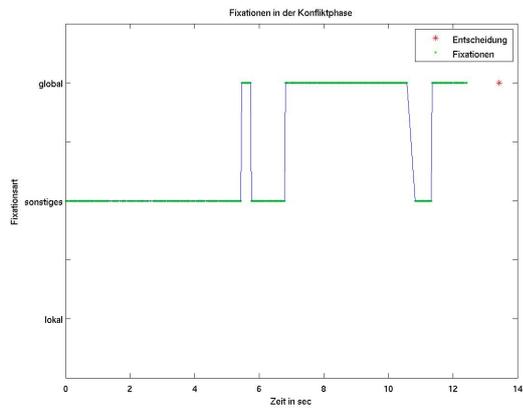


Abbildung 205: Durchgang 2

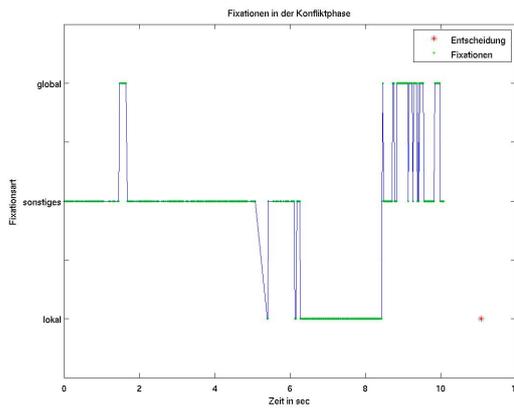


Abbildung 206: Durchgang 3

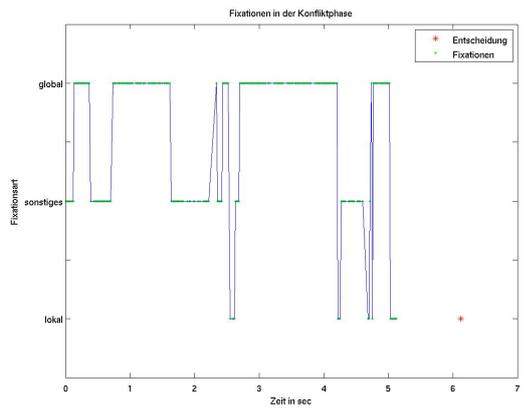


Abbildung 207: Durchgang 4

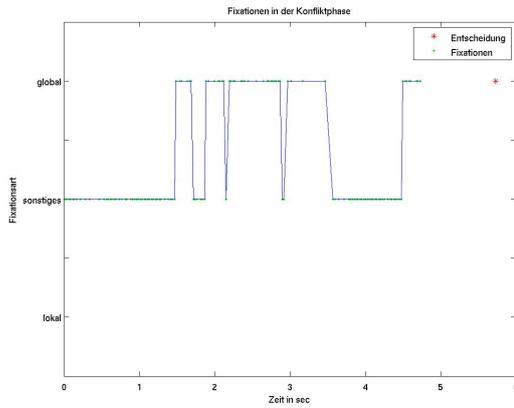


Abbildung 208: Durchgang 5

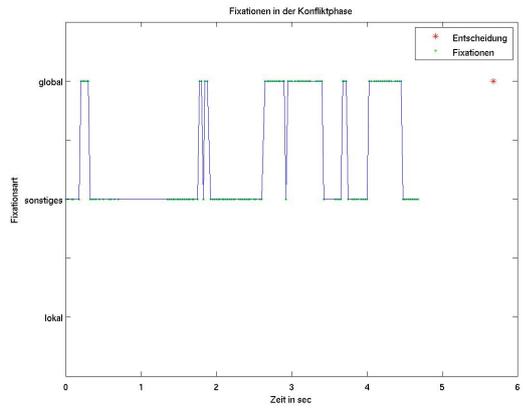


Abbildung 209: Durchgang 6

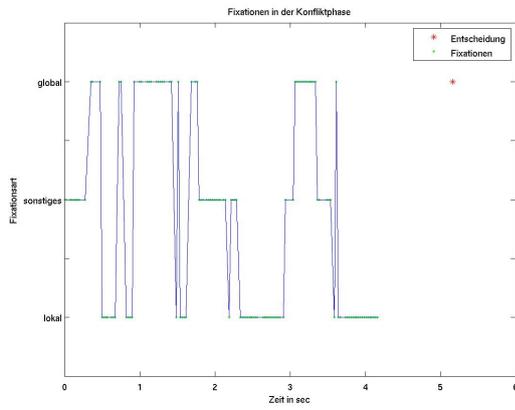


Abbildung 210: Durchgang 7

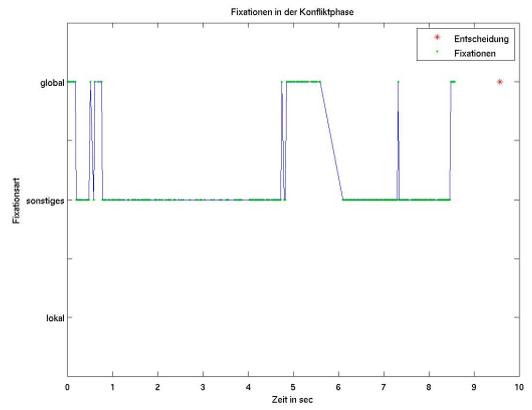


Abbildung 211: Durchgang 8

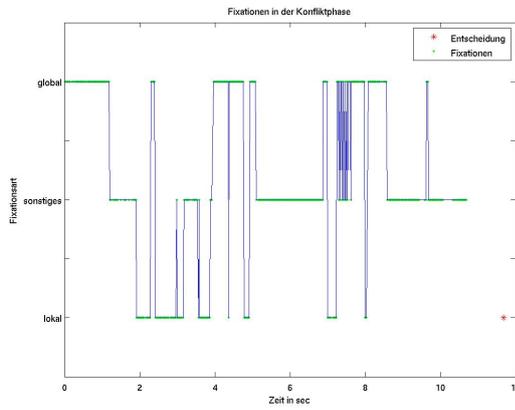


Abbildung 212: Durchgang 9

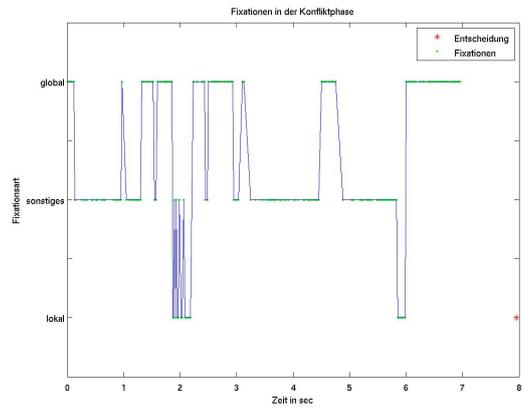


Abbildung 213: Durchgang 10

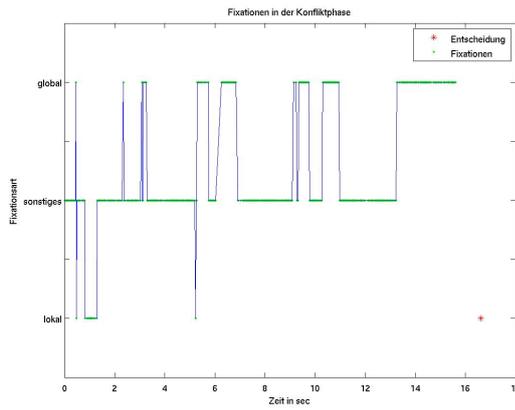


Abbildung 214: Durchgang 11

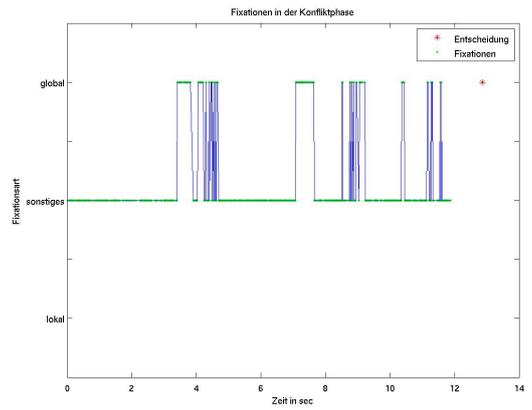


Abbildung 215: Durchgang 12

Probanden-ID: 16

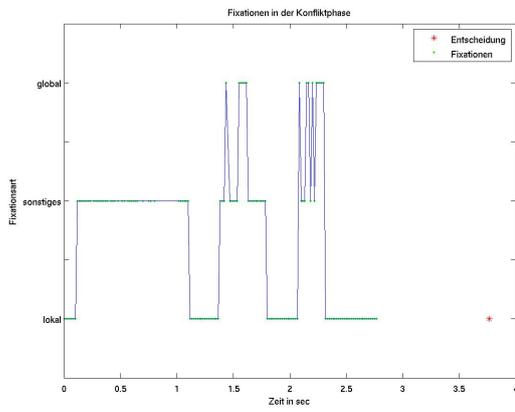


Abbildung 216: Durchgang 1

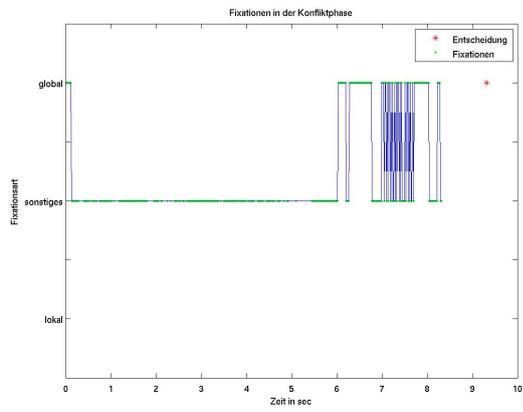


Abbildung 217: Durchgang 2

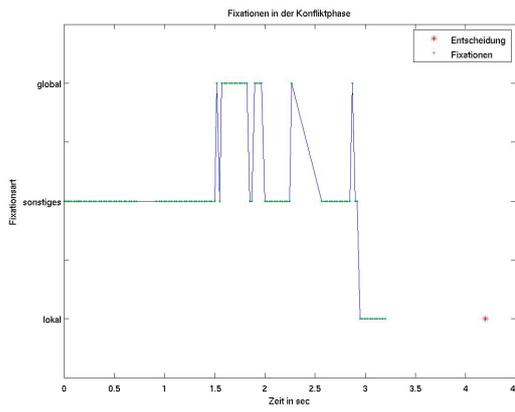


Abbildung 218: Durchgang 3

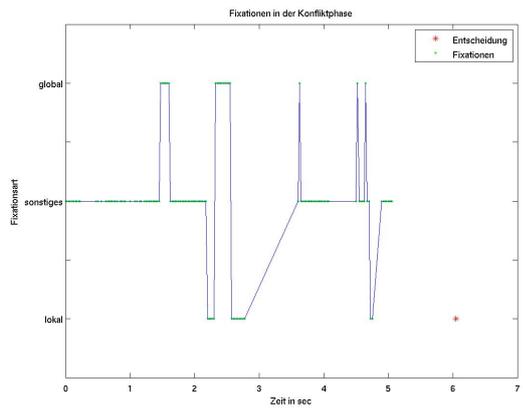


Abbildung 219: Durchgang 4

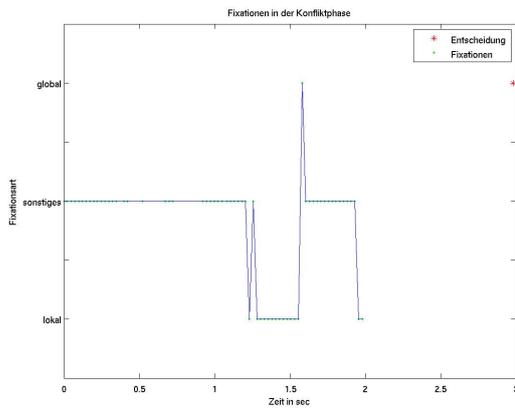


Abbildung 220: Durchgang 5

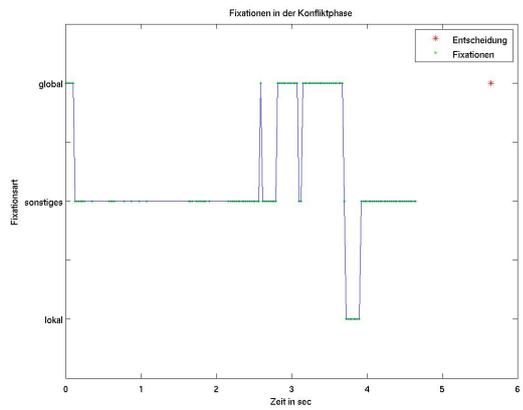


Abbildung 221: Durchgang 6

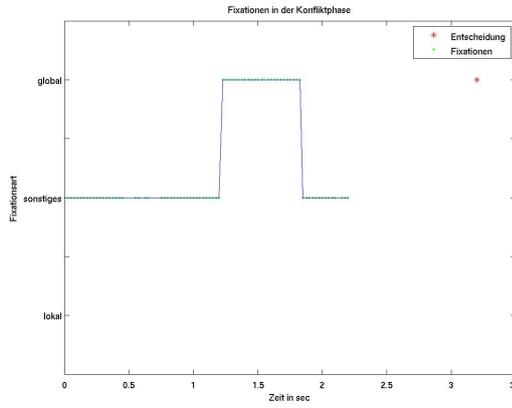


Abbildung 222: Durchgang 7

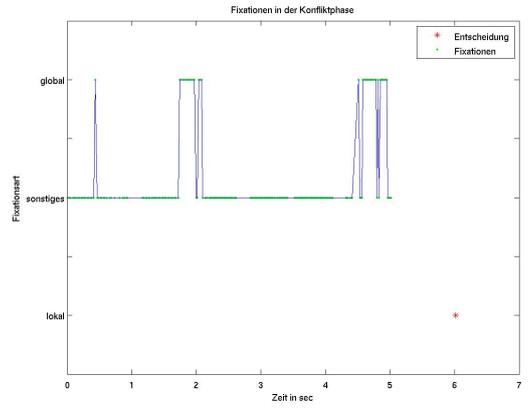


Abbildung 223: Durchgang 8

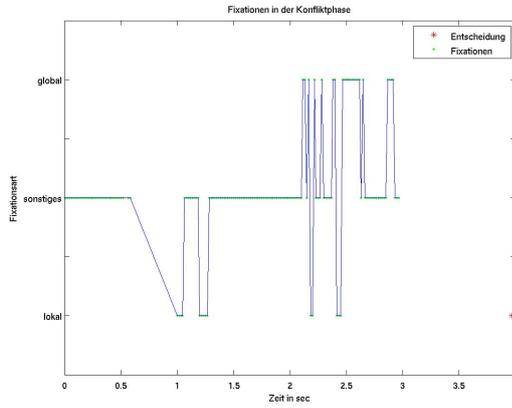


Abbildung 224: Durchgang 9

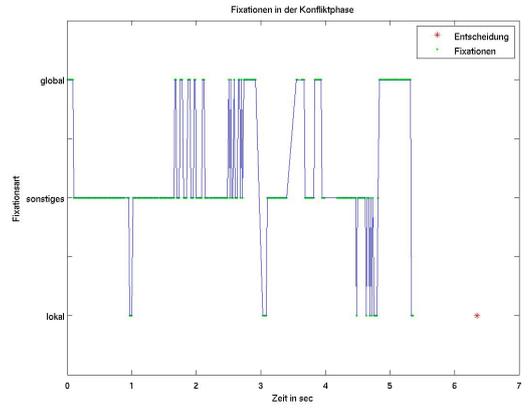


Abbildung 225: Durchgang 10

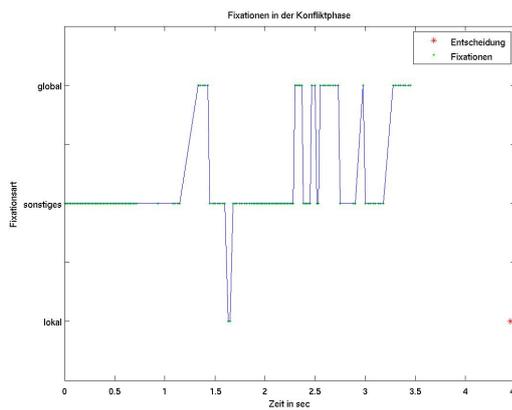


Abbildung 226: Durchgang 11

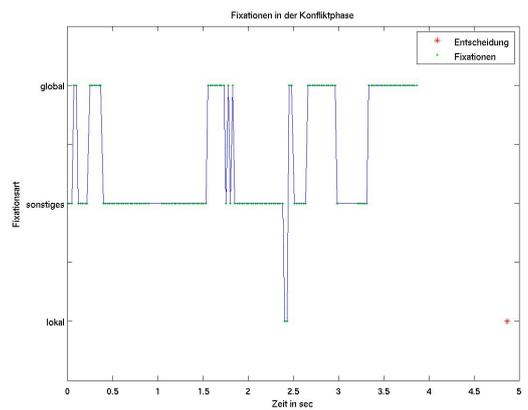


Abbildung 227: Durchgang 12

Probanden-ID: 17

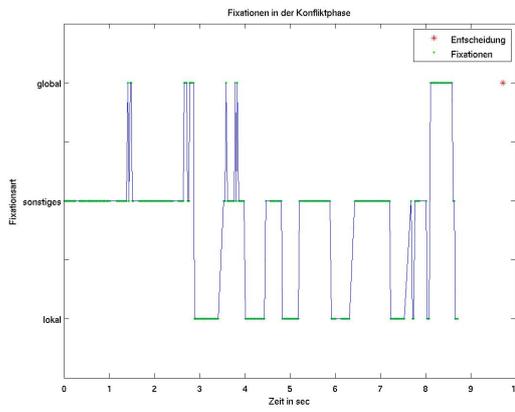


Abbildung 228: Durchgang 1

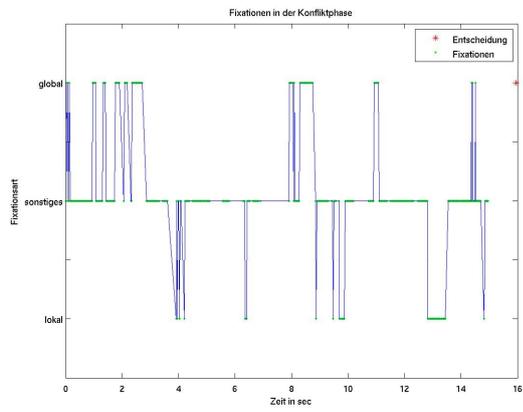


Abbildung 229: Durchgang 2

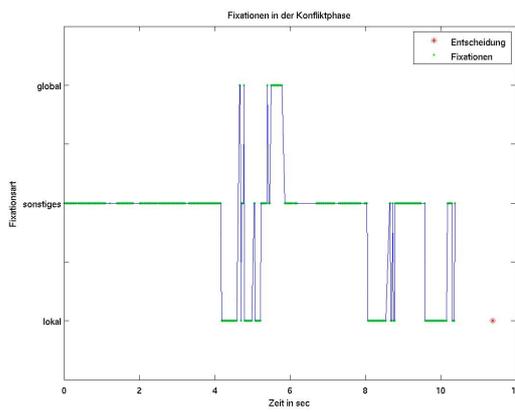


Abbildung 230: Durchgang 3

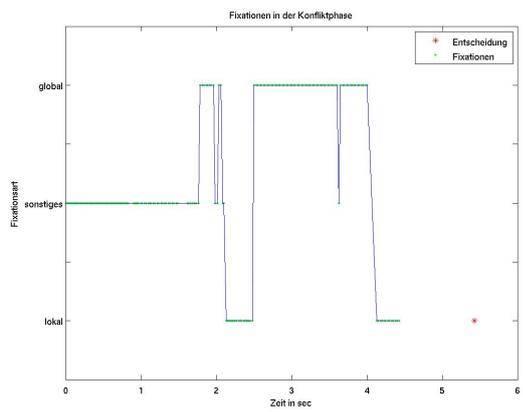


Abbildung 231: Durchgang 4

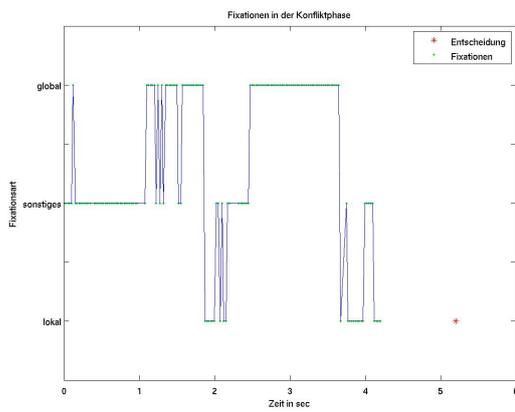


Abbildung 232: Durchgang 5

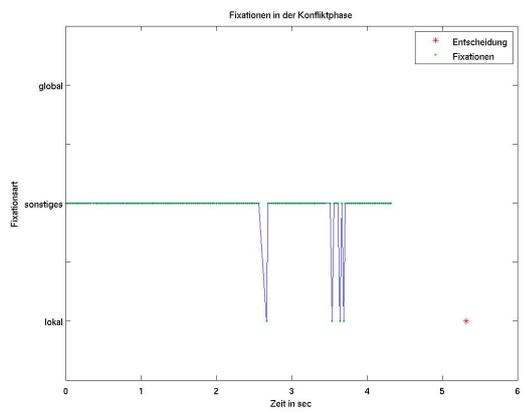


Abbildung 233: Durchgang 6

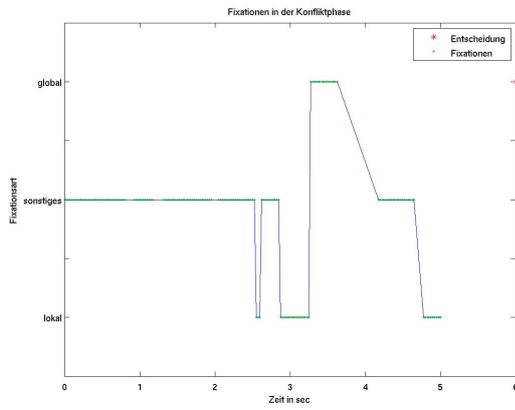


Abbildung 234: Durchgang 7

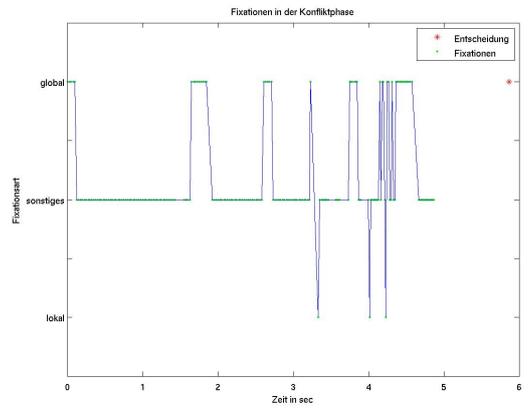


Abbildung 235: Durchgang 8

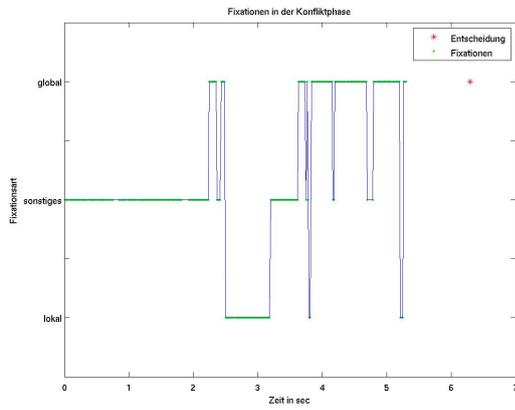


Abbildung 236: Durchgang 9

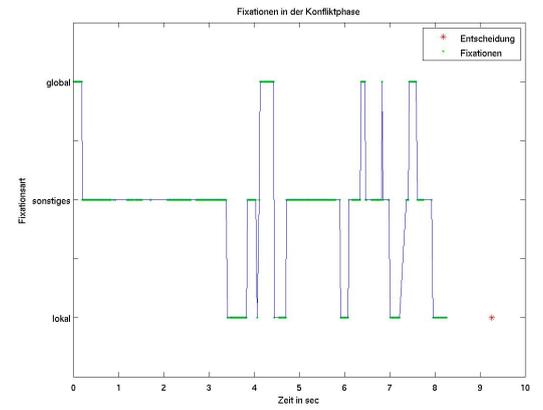


Abbildung 237: Durchgang 10

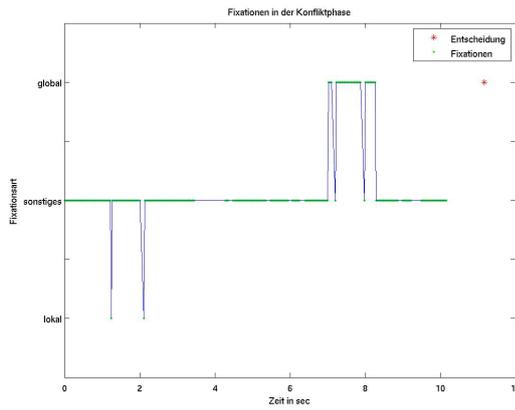


Abbildung 238: Durchgang 11

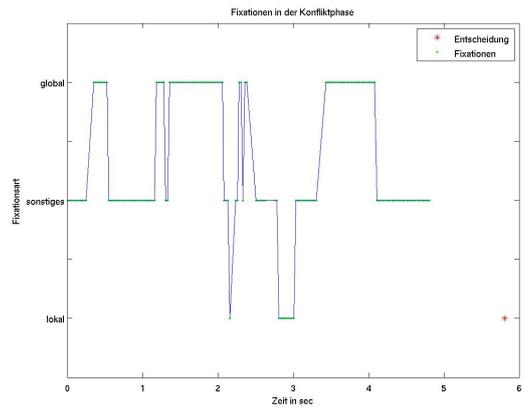


Abbildung 239: Durchgang 12

## Literatur

- [Aginsky et al., 1997] Aginsky, V., Harris, C., Rensink, R., and Beusmans, J. (1997). Two strategies for learning a route in a driving simulator. *Journal of Environmental Psychology*, 17:317–331.
- [Allen et al., 1979] Allen, G. L., Kirasic, K. C., Siegel, A. W., and Herman, J. F. (1979). Developmental issues in cognitive mapping: The selection and utilization of environmental landmarks. *Child Development*, 50(3):1062–1070.
- [Appleyard, 1970] Appleyard, D. (1970). Notes on urban perception and knowledge. *Image and Environment*, pages 109–144.
- [Bender and Brill, 2006] Bender, M. and Brill, M. (2006). *Computergrafik - Ein anwendungsorientiertes Buch*, chapter Kapitel 1 Einleitung, pages 1–5. Carl Hanser Verlag München, Wien.
- [Bridgeman et al., 1994] Bridgeman, B., van der Heijden, A., and Velichkovsky, B. M. (1994). A theory of visual stability across saccadic eye movements. *Behavioral and brain sciences*, 17:247–292.
- [Cohen and Schuepfer, 1980] Cohen, R. and Schuepfer, T. (1980). The representation of landmarks and routes. *Child Development*, 51(4):1065–1071.
- [Eichenbaum, 1996] Eichenbaum, H. (1996). Is the rodent hippocampus just for "place"? *Current Opinion and Autonomous Systems*, 6:187–195.
- [Fechner, 1860] Fechner, G. T. (1860). *Elemente der psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Harterl, 1.
- [Findlay, 1997] Findlay, J. M. (1997). Saccade target selection during visual search. *Vision Research*, 37(5):617–631.
- [Findlay, 2004] Findlay, J. M. (2004). Eye scanning and visual search. Technical report, Department of Psychology, University of Durham.
- [Franz and Mallot, 2000] Franz, M. O. and Mallot, H. A. (2000). Biomimetic robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 30:133–153.
- [Gale et al., 1990] Gale, N., Golledge, R., Pellegrino, J., and Doherty, S. (1990). The acquisition and integration of route knowledge in an unfamiliar neighborhood. *Journal of Environmental Psychology*, 10:3–25.
- [Galley, 2001] Galley, N. (2001). *Grundlagen und Methoden der Psychophysiologie*, chapter Physiologische Grundlagen und Meßmethoden der okulomotorischen Aktivität. Göttingen: Hogrefe.

- [Gillner, 1997] Gillner, S. (1997). *Untersuchungen zur bildbasierten Navigationsleistung in virtuellen Welten*. PhD thesis, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- [Gillner et al., a] Gillner, S., Hardieß, G., Dahmen, H., and Setia, L. Image correction for a curved projection screen. unpublished.
- [Gillner and Mallot, 1998] Gillner, S. and Mallot, H. A. (1998). Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10:445–463.
- [Gillner and Mallot, 2001] Gillner, S. and Mallot, H. A. (2001). Virtual reality and spatial cognition. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, pages 16211–16214.
- [Gillner et al., b] Gillner, S., Schoch, D., and Mallot, H. A. Eye movements during locomotion in real and virtual environments. unpublished.
- [Glanzer and Cunitz, 1966] Glanzer, M. and Cunitz, A. (1966). Two storage mechanisms in free recall. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 5:351–360.
- [Goldin and Thorndyke, 1982] Goldin, S. E. and Thorndyke, P. (1982). Simulating navigation for spatial knowledge acquisition. *Human Factors*, 24:457–471.
- [Hayhoe and Ballard, 2005] Hayhoe, M. and Ballard, D. (2005). Eye movements in natural behavior. *TRENDS in Cognitive Science*, 9.
- [Hermer and Spelke, 1994] Hermer, L. and Spelke, E. S. (1994). A geometric process for spatial reorientation in young children. *Nature*, 370:57–59.
- [Inhoff and Radach, 1998] Inhoff, A. W. and Radach, R. (1998). *Eye guidance in reading and scene perception*, chapter Definition and computation of oculomotor measures in the study of cognition. Amsterdam: Elsevier.
- [Jin, 2007] Jin, Y. (2007). *An Eye-Gaze Tracking Approach for Landmark Recognition in Human Navigation*. PhD thesis, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- [Jin et al., 2005] Jin, Y., Gillner, S., and Mallot, H. A. (2005). Role of eye movements in landmark identification and visual navigation. Technical report, Department of Cognitive Neuroscience, University of Tübingen, Tübingen, Germany.
- [Johansson et al., 2001] Johansson, R. S., Westling, G., A. B., and Flanagan, J. R. (2001). Eye–hand coordination in object manipulation. *The Journal of Neuroscience*, 21:6917–6932.

- [Joos et al., 2003] Joos, M., Rötting, M., and Velichkovsky, B. M. (2003). *Psycholinguistik - Ein internationales Handbuch*, chapter Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendung, pages 142–168. de Gruyter Berlin/NY.
- [Jovancevic et al., 2006] Jovancevic, J., Sullivan, B., and Hayhoe, M. (2006). Control of attention and gaze in complex environments. *Journal of Vision*, 6:1431–1450.
- [Karsh and Breitenbach, 1983] Karsh, R. and Breitenbach (1983). *Looking at the amorphous fixation measure*.
- [Land and Hayhoe, 2001] Land, M. F. and Hayhoe, M. (2001). In what ways do eye movements contribute to everyday activities? *Visual Research*, 41:3559–3565.
- [Lappe and Hoffmann, 2000] Lappe, M. and Hoffmann, K. (2000). Optic flow and eye movements. *International review of neurobiology*, 44:29–47.
- [Loomis et al., 2003] Loomis, J. M., Bailenson, J. N., Blascovich, J., and Beall, A. C. (2003). Interpersonal distance in immersive virtual environments. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 29.
- [Lynch, 1960] Lynch, K. (1960). The image of the city. Technical report, The MIT Press Cambridge, Massachusetts and London, England.
- [Maguire, 1997] Maguire, E. (1997). Hippocampal involvement in human topographical memory: evidence from functional imaging. *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)*, 352:1475–1480.
- [Mallot, 2000] Mallot, H. A. (2000). *Sehen und die Verarbeitung visueller Information - Eine Einführung*. Vieweg Computational Intelligence.
- [Mallot and Gillner, 2000] Mallot, H. A. and Gillner, S. (2000). Route navigating without place recognition: What is recognised in recognition-triggered responses? *Perception*, 29:43–55.
- [Mallot et al., 1998] Mallot, H. A., Gillner, S., van Veen, H. A. H. C., and Bühlhoff, H. H. (1998). *Spatial Cognition: An Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge*, chapter Behavioral experiments in spatial cognition using virtual reality, pages 447–467. Berlin: Springer.
- [Martinez-Conde et al., 2004] Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., and Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 5:229–240.

- [Maurer and Sèguinot, 1995] Maurer, R. and Sèguinot, V. (1995). What is modelling for? a critical review of the models of path integration. *Journal of theoretical Biology*, 175:457–475.
- [Mayer, ] Mayer, S. Berechnung eines blickvektors aus messdaten. Studienarbeit im Fach Bioinformatik.
- [Michon and Denis, 2001] Michon, P.-E. and Denis, M. (2001). *When and Why Are Visual Landmarks Used in Giving Directions?* Springer Berlin / Heidelberg.
- [Mittelstaedt and Mittelstaedt, 1980] Mittelstaedt, M. and Mittelstaedt, H. (1980). Homing by path integration in a mammal. *Naturwissenschaften*, 67:566–567.
- [Müller and Wehner, 1988] Müller, M. and Wehner, R. (1988). Path integration in desert ants. *cataglyphis fortis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 85:5287– 5290.
- [O’Keefe and Nadel, 1978] O’Keefe, J. and Nadel, L. (1978). The hippocampus as a cognitive map. Technical report, Oxford University Press.
- [Orlamünder and Mascolus, 2004] Orlamünder, D. and Mascolus, W. (2004). *Computergrafik und OpenGL*, chapter Grafische Bibliothek OpenGL, pages 13–17. Fachbuchverlag Leipzig Carl Hanser Verlag.
- [Precht et al., 2004] Precht, M., Meier, N., and Tremel, D. (2004). *EDV-Grundwissen - Eine Einführung in Theorie und Praxis der modernen EDV*. Addison-Wesley.
- [Presson and Montello, 1988] Presson and Montello (1988). Points of reference in spatial cognition: Stalking the elusive landmark. *British Journal of Developmental Psychology*, 6:378–381.
- [Reimer and Sodhi, 2006] Reimer, B. and Sodhi, M. (2006). Detecting eye movements in dynamic environments. *Behavior Research Methods*, 38:667–682.
- [Röhrich, 2007] Röhrich, W. (2007). Augenbewegungen und die salienz von landmarken in einer wegfindeaufgabe. Master’s thesis, Diplomarbeit, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- [Rolls et al., 1998] Rolls, E. T., Treves, A., Robertson, R., Georges-Francois, P., and Panzeri, S. (1998). Information about spatial view in an ensemble of primate hippocampal cells. *Journal of Neurophysiology*, 79:1797–1813.
- [Rothländer, ] Rothländer, C. Automatische bestimmung von fixierten objekten bei verzerrter projektion auf eine zylindrische leinwand. Studienarbeit im Fach Bioinformatik.

- [Rötting and Seifert, 1999] Rötting, M. and Seifert, K. (1999). *Blickbewegungen in der Mensch-Maschine-Systemtechnik*. Pro Universitate Verlag Sinzheim.
- [Salvucci, 1999] Salvucci, D. D. (1999). *Mapping Eye Movements to Cognitive Processes*. Doctoral thesis, Carnegie Mellon University Pittsburgh.
- [Schandry, 1989] Schandry, R. (1989). *Lehrbuch der Psychophysiologie: körperliche Indikatoren psychischen Geschehens*.
- [Siegel and White, 1975] Siegel, A. and White, S. (1975). The development of spatial representation of large-scale environments. *Advances in child development and behavior*, 10:9–55.
- [Steck and Mallot, 2000] Steck, S. D. and Mallot, H. A. (2000). The role of global and local landmarks in virtual environments navigation. *Presence*, 9:69–83.
- [Tolman, 1948] Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55:189–208.
- [Triesch et al., 2003] Triesch, J., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., and Sullivan, B. T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, 3:86–94.
- [Trullier et al., 1997] Trullier, O., Wiener, S., Berthoz, A., and Meyer, J. (1997). Biologically based artificial navigation systems: Review and prospects. *Progress in Neurobiology*, 51:483–544.
- [van Veen et al., 1998] van Veen, H. A., Distler, H. K., Braun, S. J., and Bühlhoff, H. H. (1998). Navigating through a virtual city: Using virtual reality technology to study human action and perception. *Future Generation Computer Systems*, 14:231–242.
- [Volkman et al., 1978] Volkman, F. C., Riggs, L., and White, K. (1978). *Central and peripheral determinants of saccadic suppression*.
- [Werner et al., 1997] Werner, S., Krieg-Brückner, B., Mallot, H. A., Schweizer, K., and Freksa, C. (1997). *Informatik aktuell*, chapter Spatial Cognition: The Role of Landmark, Route, and Survey Knowledge in Human and Robot Navigation, pages 41–50. Springer-Verlag, Berlin.
- [Wolf and Wolf, 1990] Wolf, R. and Wolf, D. (1990). *Vom Reiz der Sinne*, chapter Vom Sehen zur Wahrnehmung: Aus Illusionen entsteht ein Bild. Weinheim: VCH.
- [Wörmann, 2000] Wörmann, M. (2000). Scannen und fokussieren - Auswirkungen verbaler Kommunikation auf das Blickverhalten beim Autofahren. Master's thesis, Bayerische Julius-Maximilian Universität, Würzburg.

[Yarbus, 1967] Yarbus, A. L. . (1967). Eye movements and vision. *Plenum Press*.

[Young and Sheena, 1975] Young, L. and Sheena, D. (1975). Survey of eye movement recording methods. *Behavioral Research Methods & Instrumentation*, 7:3778–429.