

Diplomarbeit Bioinformatik

Die Rolle des Arbeitsgedächtnisses in
einem virtuellen dynamischen
Kollisionsvermeidungsexperiment

von

Stephan Storch

30. April 2008

Betreuer:

Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot (Biologie)

Prof. Dr. Andreas Zell (Informatik)

Eberhard Karls Universität Tübingen

Erklärung der Selbständigkeit

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate deutlich kenntlich gemacht zu haben.

Tübingen, den 30. April 2008

Stephan Storch

Inhaltsverzeichnis

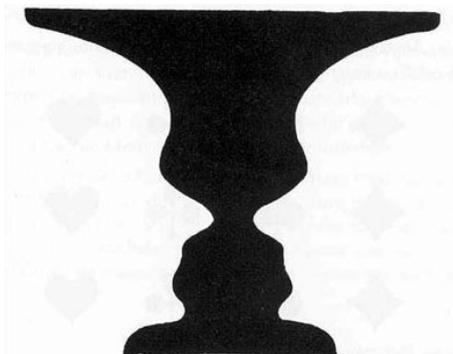
1	Einleitung	1
1.1	Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell	3
1.1.1	Die phonologische Schleife	3
1.1.2	Der visuell-räumliche Notizblock	4
1.1.3	Der episodische Puffer	4
1.1.4	Die zentrale Exekutive	4
1.2	Das visuelle Arbeitsgedächtnis (VSTM)	5
1.3	Motivation und Fragestellung	8
2	Material und Methoden	11
2.1	Das Paradigma	11
2.1.1	Aufbau und Überblick	11
2.1.2	Ablauf eines Versuchsdurchgangs	13
2.2	Erzeugung und Darstellung der experimentellen Umgebung	17
2.2.1	Erzeugung	17
2.2.2	Darstellung	18
2.3	Messung von Kopf- und Augenbewegungen	19
2.3.1	Messung der Augenbewegungen	19
2.3.2	Messung der Kopfbewegungen	21
2.4	Probanden	21
2.5	Experimentdurchführung	22
2.5.1	Instruktion	22
2.5.2	Kalibrierung der Messsysteme	22
2.5.3	Training	23
3	Ergebnisse	24
3.1	Auswertung der Positionierungsdaten Teil A	24
3.1.1	Anzahl positionierter Autos	24
3.1.2	Verteilung der positionierten Autos	26
3.1.3	Anzahl positionierter Autos in Relation zur Gesamtanzahl vorhandener Autos	27

3.1.4	Anzahl positionierter Autos in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung	27
3.1.5	Clusterbildung beim Positionieren	28
3.2	Auswertung der Positionierungsdaten Teil B	28
3.2.1	Übereinstimmung der Größe der positionierten Autos	31
3.2.2	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl positionierter Autos	31
3.2.3	Positionierungsfehler in Abhängigkeit des Abstands zur Kreuzung	31
3.2.4	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Setzreihenfolge	32
3.2.5	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung	33
3.2.6	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung	34
3.3	Fragebogen Auswertung	34
4	Diskussion	36
4.1	Auswertung der Positionierungsdaten Teil A	36
4.1.1	Anzahl positionierter Autos	36
4.1.2	Verteilung der positionierten Autos	36
4.1.3	Anzahl positionierter Autos in Relation zur Gesamtanzahl vorhandener Autos	37
4.1.4	Anzahl positionierter Autos in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung	37
4.1.5	Clusterbildung beim Positionieren	37
4.2	Auswertung der Positionierungsdaten Teil B	37
4.2.1	Übereinstimmung der Größe der positionierten Autos	38
4.2.2	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl positionierter Autos	38
4.2.3	Positionierungsfehler in Abhängigkeit des Abstandes zur Kreuzung	38
4.2.4	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Setzreihenfolge	39
4.2.5	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung	39
4.2.6	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung	39
4.3	Fragebogen Auswertung	39
4.4	Zur Eignung des Paradigmas - Die aufgabenbezogene Untersuchung des VSTMs	39
5	Zusammenfassung und Ausblick	42
	Literaturverzeichnis	44
	Anhang	48
	Appendix A - Instruktion	49
	Appendix B - Fragebogen	50

KAPITEL 1

Einleitung

In allen Bereichen des täglichen Lebens sind wir auf die Fähigkeit angewiesen, eine multi-sensorische und ständigen Veränderungen unterworfenen Informationsmenge zu verarbeiten. Damit dies möglich wird, sind viele Untereinheiten der sensorischen Verarbeitung nötig, von den verschiedenen Sinnesorganen und deren Reiz-Reaktions-Schemata, über die Verschaltung und Weiterleitung zum zentralen Nervensystem, bis zur eigentlichen Verarbeitung der elektrischen Signale im Gehirn. Schließlich werden die verschiedenen Sinneseindrücke kombiniert und interpretiert. Diesen letzten Verarbeitungsschritt, also den Übergang von physikalischen Reizen zur subjektiven Welt, bezeichnet man als Wahrnehmung.



(a) Eine Vase oder zwei Köpfe?



(b) Eine junge oder eine alte Frau?

Abbildung 1.1: Die beiden Bilder sind mehrdeutig. Unser Gehirn liefert uns eine Interpretation, indem es nach bekannten Mustern in den Bildern sucht. Man kann diese Interpretation jedoch auch bewusst beeinflussen und so jeweils zwei mögliche Bedeutungen sehen.

Die zur Verfügung stehenden Informationen können oft unvollständig oder auch mehrdeutig sein, und trotzdem versucht uns unser Gehirn immer mit einer „sinnvollen“ Interpretation der eingehenden Reize zu versorgen (s. zwei Beispiele in Abbildung 1.1). Um dies leisten zu können, greift das Gehirn unter anderem auf frühere Erfahrungen und Gelerntes zurück. Dies hat zwei unmittelbare Folgen für unsere Wahrnehmung. Zum einen, dass wir sehr häufig trotz unvollständiger Informationen eine konkrete Interpretation erhalten

(ohne dass wir uns über die Vollständigkeit der zugrunde liegenden Information bewusst wären) und zum anderen aber natürlich auch, dass diese Interpretation nicht unbedingt der Realität entspricht.

Die wissenschaftliche Disziplin der Psychophysik sucht nach Regeln oder Erklärungen für das Zustandekommen solcher Wahrnehmungsphänomene. Dabei wird unterschieden, zwischen der *äußeren Psychophysik*, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Reizungen der Sinnesorgane und dem Erlebten beschäftigt, und der *inneren Psychophysik*, die die Zusammenhänge zwischen der neuronalen Verschaltung und dem Erlebten untersucht und der kognitiven Neurowissenschaft zuzuordnen ist. Die Fragestellung in der hier beschriebenen Studie enthält Aspekte aus beiden Bereichen der Psychophysik und beschäftigt sich mit einer Verschaltungsstelle der Wahrnehmungsverarbeitung, dem *Arbeitsgedächtnis*.

Damit wir mit den gelieferten Interpretationen (zum Beispiel ein Wort, das wir kennen, ein Geräusch, das wir einer bestimmten Quelle zuordnen können, oder geometrische Objekte, die sich zu einem Gesamtbild zusammensetzen können) arbeiten können, benötigen wir nicht nur die Fähigkeit, eingehende Reize zu interpretieren, sondern auch eine Repräsentationsebene, auf der das Wahrgenommene festgehalten werden kann. Es muss also einen oder mehrere Speicherorte geben, die es uns ermöglichen, Objekte zu speichern und auf sie zuzugreifen, damit wir mit ihnen arbeiten, z.B. sie vergleichen oder wiedergeben können.

Für Erfahrungen, Erlebnisse und Wissen ist der Mensch mit dem Langzeitgedächtnis ausgestattet. Hier können Informationen unterschiedlicher Art in großer Menge und für sehr lange Zeit, teilweise unser ganzes Leben lang, gespeichert werden. Damit Informationen aus dem Langzeitgedächtnis abrufbar sind, müssen sie erst dort manifestiert werden und bis eine bestimmte Information oder Fähigkeit letztendlich hier abgespeichert wird, ist zum Teil ein vielfach wiederholtes Verarbeiten (Lernen) derselben nötig.

Der Mensch verfügt neben dem Langzeitgedächtnis über eine sehr schnell beschreib- und lesbare Speichereinheit, die für die Prozessierung bzw. Zwischenspeicherung der aktuellsten Sinneseindrücke zuständig ist, beispielsweise für die Speicherung der letzten wenigen Worte eines gehörten oder gelesenen Satzes, oder für eine grobe Orientierung im Raum, z.B. basierend auf der Anordnung von Objekten. Dieser schnelle und limitierte Speicher, der für die Vorhaltung von Objekten im Bereich weniger Millisekunden bis Sekunden verantwortlich ist, wird als Arbeitsgedächtnis bezeichnet. Die folgenden Kapitel sollen eine Einordnung sowie einen Überblick über die Eigenschaften des Arbeitsgedächtnisses geben. Dabei werde ich hauptsächlich auf eine Untereinheit des Arbeitsgedächtnisses eingehen, nämlich das *visuelle Arbeitsgedächtnis*, mit dem ich mich in meiner Diplomarbeit zentral beschäftigt habe.

1.1 Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell

Erstmals 1974 von Alan D. Baddeley und Graham J. Hitch eingeführt und seitdem weiter entwickelt [Bad00], gilt *Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell* (auch Multikomponentenmodell, s. Abbildung 1.2) [Bad01, Bad03] heute als akzeptiert. Es beschreibt drei Untereinheiten des Arbeitsgedächtnisses (*Phonologische Schleife*, *visuell-räumlicher Notizblock*, *episodischer Puffer*), die für verschiedene Aufgabenbereiche zuständig sind, sowie eine übergeordnete Steuerungseinheit, die *zentrale Exekutive* (engl: *central executive*), die die Einzelbereiche koordiniert.

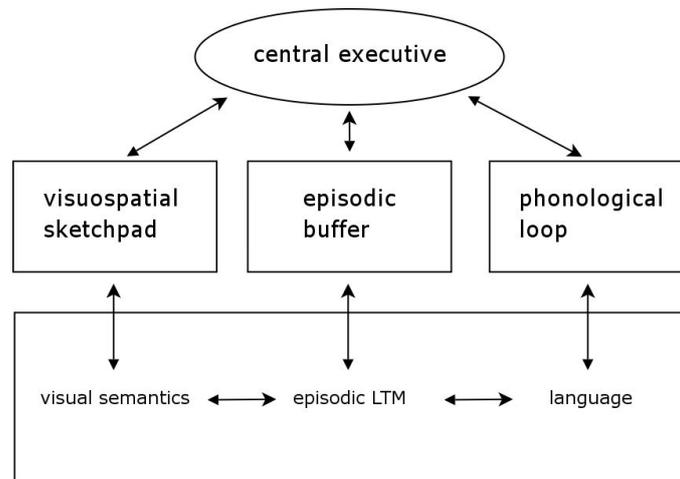


Abbildung 1.2: Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell - schematisch

1.1.1 Die phonologische Schleife

Die phonologische Schleife (engl: *phonological loop*) [Bad03, Bad07] ist verantwortlich für auditorische Sinneseindrücke. Sie wird in zwei Subkomponenten unterteilt: einen phonologischen Kurzzeitspeicher, der Gedächtnisinhalte für wenige Sekunden erhalten kann, bevor sie verblässen, sowie einen subvokalen Auffrischungsprozess (engl: *articulatory rehearsal process*), der den Inhalt des Kurzzeitspeichers immer wieder erneuert. Die Kapazität des Speichers ist begrenzt in der Anzahl der möglichen gespeicherten Objekte. Die Erklärung hierfür ist, dass die subvokale Wiederholung eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt [Bad03]. Ist nun die Anzahl der zu wiederholenden Objekte (z.B. Buchstaben oder Zahlen) zu groß, so wird das erste Objekt verblässen, bevor alle Objekte ein mal wiederholt werden konnten.

Neben der Anzahl der Objekte können auch bestimmte Eigenschaften dieser Objekte die Speicherkapazität beeinflussen. So konnte zum Beispiel für Buchstabenfolgen gezeigt werden, dass es schwieriger ist, eine Reihe von ähnlich klingenden Buchstaben wiederzugeben,

z.B. „V, B, G, T, P, C“¹ als eine Folge unterschiedlich klingender Buchstaben „W, X, K, R, Y“ [Con64]. Auch für Folgen von nicht sinnhaft verbundenen Wörtern hat sich deren Klang als entscheidendes Kriterium herausgestellt, während die Bedeutung der einzelnen Worte relativ unwichtig ist² [Bad66b].

1.1.2 Der visuell-räumliche Notizblock

Der visuell-räumliche Notizblock ist, wie der Name schon sagt, verantwortlich für visuelle Objekte und deren räumliche Konfiguration. Er ist die Komponente, die dem visuellen Kurzzeitgedächtnis³ (engl: *visual short-term memory* - *VSTM*) zugrunde liegt und damit im Mittelpunkt der Diplomarbeit steht. Das VSTM wird daher in einem eigenen Kapitel (s. Kapitel 1.2) ausführlicher beschrieben.

1.1.3 Der episodische Puffer

Der episodische Puffer (engl: *episodic buffer*) wurde erst im Lauf der Entwicklung von Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell eingeführt [Bad00]. Er hat ebenso wie die ersten beiden Komponenten temporären Charakter und ist hinsichtlich der Kapazität limitiert. Darüberhinaus können hier allerdings Informationen von unterschiedlichen Quellen integriert werden. Der episodische Puffer bildet eine Schnittstelle zum episodischen Langzeitgedächtnis (s. Abbildung 1.2). Gesteuert wird er von der zentralen Exekutive durch bewusste Kontrolle.

1.1.4 Die zentrale Exekutive

Die zentrale Exekutive wird von Baddeley [Bad03] als wichtigste, aber noch am wenigsten verstandene Komponente des Arbeitsgedächtnisses bezeichnet. Zunächst diente sie nur als eine Art Sammel-Pool für alle noch unverstandenen Prozesse. Später wurde das Bild jedoch verfeinert. Über zwei konkurrierende Prozesse wird hier die Aufmerksamkeitssteuerung übernommen. Der erste Prozess beruht auf bekannten Schemata und Mustern, er ist für routinehaft durchgeführte Aufgaben zuständig (z.B. die tägliche Fahrt zur Arbeitsstelle). Der zweite Prozess wird durch das Überwachungs-Aktivierungs-System (engl: *supervisory activating system* - *SAS*) gelenkt. Belege für die Existenz des SAS kommen hauptsächlich aus Studien mit Patienten mit Schädigungen im Bereich des Frontallappens, die zu gestörter Aufmerksamkeitssteuerung führten. Diese Patienten zeigten in manchen Situationen unpassend beharrliches Verhalten, während sie in anderen Situationen extrem leicht abgelenkbar waren [Sha91]. Weitere Belege für das Konzept des SAS können in

1 Achtung: die Studie wurde auf englisch durchgeführt, daher muss auch die englische Aussprache der Buchstaben angenommen werden.

2 Mit dem Übergang ins Langzeitgedächtnis wird die Bedeutung der Wörter allerdings entscheidend und der Klang unwichtig [Bad66a].

3 In der Literatur sind die beiden Begriffe visuelles Kurzzeitgedächtnis und visuelle Arbeitsgedächtnis zu finden, die hier synonym verwendet werden.

[Bar96, Bar00, Cha99], sowie in [Bau98, Mur00] gefunden werden. Neben dem Sitz der Aufmerksamkeitskontrolle sieht Baddeley die zentrale Exekutive auch als Schnittstelle zum Langzeitgedächtnis [Bad03].

1.2 Das visuelle Arbeitsgedächtnis (VSTM)

Das VSTM ist, wie die phonologische Schleife, hinsichtlich der Kapazität ($\sim 3-4$ Objekte) [Alv04, Bad03, Luc97] und der Dauer der Informationsbereitstellung limitiert. Daraus folgt unter anderem, der relativ prominente Effekt der Veränderungsblindheit (engl: *change blindness*) bzw. Veränderungsdetektion (engl: *change detection*)¹. Die intuitive Annahme, dass wir alles, was sich gerade in unserem Gesichtsfeld befindet, auch bewusst wahrnehmen, ist weit von der Wirklichkeit entfernt [Ren97]. Vielmehr haben wir eine recht gute Repräsentation vom aktuellen Fixationsort ($+ 2^\circ$), sowie von einigen Orten/Objekten, die vorher schon einmal fixiert wurden, aber eben nur, soweit es die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses zulässt.

Ein einfaches Experiment zur Veranschaulichung dieses Effekts besteht aus der Präsentation eines Bildes, gefolgt von einer kurzen Unterbrechung (z.B. schwarzer Bildschirm), gefolgt von der Präsentation einer Variante des ersten Bildes, in der eine kleine Änderung vorgenommen wurde (z.B. die Farbe eines Objekts). Die einmalige Präsentation dieser Folge wird experimentell als „*one-shot paradigm*“ bezeichnet, die mehrfache Wiederholung der Abfolge als „*flicker paradigm*“ (s. Abbildung 1.3). Im zweiten Fall wird die Präsentation entweder für einen festen Zeitraum oder bis die Versuchsperson (VP) angibt, die Veränderung entdeckt zu haben, wiederholt.

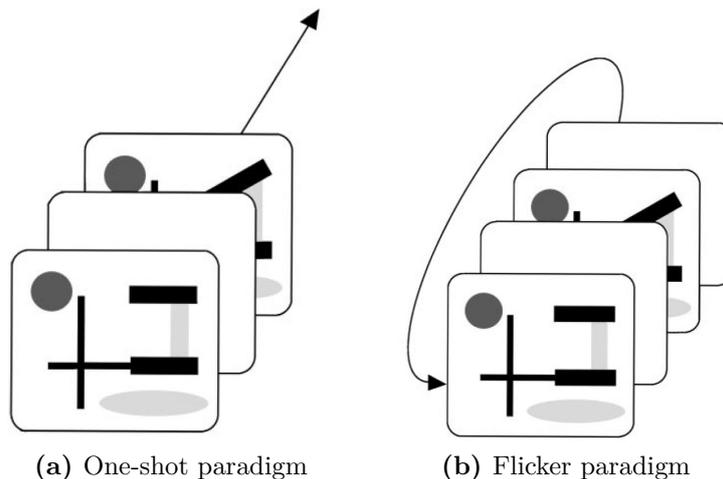


Abbildung 1.3: Schematische Darstellungen aus [Ren02].

Die Veränderungsblindheit wurde auch in vielen anderen Paradigmen getestet, die aber

¹ Eine eingehende Beschreibung kann zum Beispiel in [Ren02] gefunden werden.

meist eine Gemeinsamkeit haben, nämlich die Abfolge *Bild -> Unterbrechung der Präsentation -> Bild*. Die Unterbrechung der Präsentation ist sehr wichtig, da wir die Veränderung sonst als Bewegung wahrnehmen könnten, unabhängig davon, ob wir das veränderte Objekt in unserer internen Repräsentation abgespeichert haben. Veränderungsblindheit konnte jedoch auch in Experimenten ohne solche Unterbrechungen gezeigt werden. Die Art der Unterbrechung kann sehr unterschiedlich sein [Sim00]. Letztlich konnte gezeigt werden, dass wir selbst für große Veränderungen blind sind, wenn wir die betreffenden Objekte nicht (zufällig) kurz vor der Veränderung fixiert hatten [Ren97, Sim97].

Hier mag die Frage aufkommen, warum wir nicht die gesamte zur Verfügung stehende Information abspeichern sollten. Der Mensch hat binokulares Gesichtsfeld von ca. 180° horizontal \times 110° vertikal [Sch05, S. 395] und der Anteil dessen, der intern repräsentiert wird, kann je nach Informationsdichte relativ gering sein. Baddeley gibt eine mögliche Erklärung dafür an [Bad03], warum es gar nicht nötig ist, die gesamte Information abzuspeichern: der Großteil der uns umgebenden Welt ist relativ unveränderlich. Wenn wir eine visuelle Information aus der Umwelt benötigen, die nicht in unserer internen Repräsentation enthalten ist, so können wir diese fehlende Information durch wenige „kostengünstige“ Aktionen (Blicksprünge zu neuen Fixationsorten) erlangen. Die Umwelt wird dabei als eine Art *externer Speicher* gesehen, auf den man jederzeit zugreifen kann [O’R92].

Diese quantitative Limitierung ist ein zentrales Charakteristikum des VSTM und erfährt seit längerem reges Forschungsinteresse. Abbildung 1.4 zeigt zwei Paradigmen, die zum Beispiel auch ohne Rechnerunterstützung durchgeführt werden können. Beim *Corsi Block Tapping Task* (s. Abbildung 1.4 (a)) wird eine geometrische Anordnung von Blöcken verwendet. Der Versuchsleiter gibt dann, z.B. durch Tippen auf diese Blöcke, eine Sequenz vor, die vom Probanden wiedergegeben werden soll. Dabei wird die Länge der Sequenz variiert und untersucht, bis zu welcher Länge die Sequenz wiedergegeben werden kann. In einem anderen Paradigma wird eine schachbrettartige Anordnung von weißen und schwarzen Feldern (s. Abbildung 1.4 (b)) kurz gezeigt und anschließend entfernt. Anschließend wird eine kleinere Konfiguration weißer und schwarzer Felder gezeigt. Der Proband soll in diesem Fall entscheiden ob die zweite Konfiguration in der ersten enthalten war. Die Anzahl der Felder kann variiert werden.

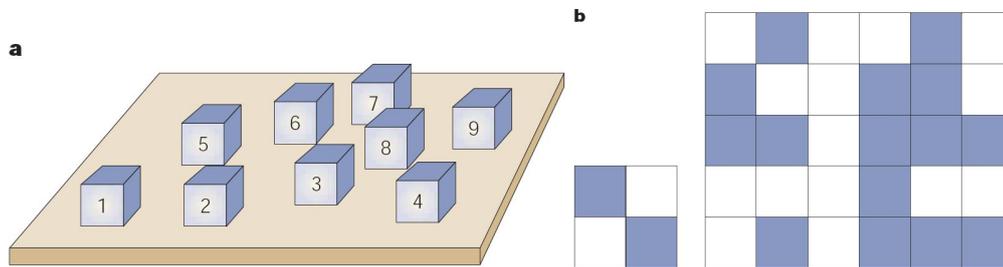


Abbildung 1.4: Zwei Paradigmen zur Untersuchung des VSTM [Bad03]: (a) Das „Corsi Block Tapping“ Paradigma. Der Versuchsleiter zeigt durch Tippen mit dem Finger auf die Boxen eine Sequenz, die vom Probanden wiedergegeben werden soll. (b) Eine Anordnung von schwarzen und weißen Feldern wird gezeigt. Diese Anordnung wird entfernt und eine (kleinere) zweite Anordnung gezeigt. Der Proband soll entscheiden, ob die zweite Anordnung in der ersten enthalten war.

Eine andere Gruppe von Paradigmen zur Untersuchung der Obergrenze an Objekten, die gleichzeitig im VSTM gespeichert werden können, macht sich den oben beschriebenen Effekt der Veränderungsblindheit zu Nutze. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 1.5 abgebildet. Neben der reinen Anzahl von Objekten kann auch die Art bzw. Komplexität der gezeigten Objekte einen Einfluss auf das Speicherungsmaximum haben. In einer Studie von Xu et al wurden dazu stabförmige Objekte in einem „one-shot“ Paradigma verwendet [Xu06]. Als Abfrage wurde ein einzelnes Objekt aus der ursprünglichen Anordnung gezeigt und die Probanden sollten entscheiden, ob dieses Objekt modifiziert wurde. Die möglichen Modifizierungen wurden unterteilt in „leicht zu erkennen“, wenn die Farbe des Mittelteils der Stäbe verändert wurde und „schwer zu erkennen“, wenn nur der Durchmesser der Enden variiert wurde.

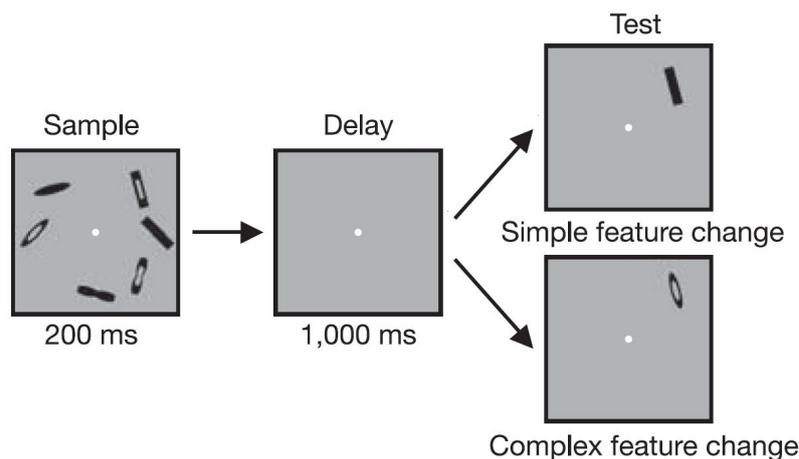


Abbildung 1.5: Paradigma zur Untersuchung des VSTM über Veränderungsblindheit [Xu06]. Die zeitliche Abfolge entspricht dem Grundprinzip des „one-shot“ Paradigma. In einer Studie von Xu et al wurde mit diesem Paradigma in zwei unterschiedlichen Varianten untersucht, ob die Art der Veränderung (oben: „leicht zu erkennen“, unten „schwer zu erkennen“) einen Einfluss auf die quantitative Limitierung hat.

Während viele Ergebnisse zur Limitierung des VSTM aus Untersuchungen auf solchen statischen Paradigmen beruhen, gibt es auch Beispiele für Untersuchungen des VSTM in dynamischen Versuchsumgebungen. Ein Beispiel hierfür wird in Abbildung 1.6 gezeigt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, eine zu Anfang markierte Untermenge von bewegten, nicht unterscheidbaren Objekten zu verfolgen. Die Anzahl der zu Beginn markierten Objekte wurde zwischen einem und fünf Objekten variiert. Am Ende stand eine Abfrage, in der die Probanden entscheiden mussten, ob ein bestimmtes Objekt zu der anfänglich markierten Untermenge gehört. Es wurde ein signifikanter Einfluss der Anzahl zu verfolgender Objekte gezeigt. Bei der in dieser Studie maximalen Anzahl von fünf zu verfolgenden Objekten entschieden die Probanden noch zu 64,5% richtig [All06].



Abbildung 1.6: In diesem dynamischen Paradigma [All06] besteht die Aufgabe darin, mehrere sich bewegende Kreuze zu verfolgen. (a) Zunächst sind die Kreuze in Ruhe. Während dieser Ruhephase werden durch Blinken diejenigen Kreuze markiert, die verfolgt werden sollen (hier durch eckige Rahmen angedeutet). (b) Alle Kreuze bewegen sich mit unterschiedlichen Trajektorien. (c) Die Bewegung der Kreuze wird beendet. Ein Kreuz wird markiert. Der Proband muss entscheiden, ob es sich um eines der anfänglich markierten Kreuze handelt.

Alvarez und Franconeri zeigten in einem ähnlichen Paradigma, dass die Geschwindigkeit der Objekte einen Einfluss auf die maximale Anzahl memorierbarer Objekte hat und dass die Kapazität des VSTM damit keine feste Grenze hat. Bei niedrigen Geschwindigkeiten konnten in dieser Studie bis zu acht Objekte verfolgt werden. Durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit brach die Leistung zusammen, bis bei einer entsprechenden Objektgeschwindigkeit nur noch ein einzelnes Objekt verfolgt werden konnte [Alv07].

1.3 Motivation und Fragestellung

An den Beispielen im vorhergehenden Kapitel sollen zwei mögliche Einschränkungen veranschaulicht werden. Erstens ist die Auswahl der Objekte in vielen der Paradigmen sehr abstrakt. Meist werden einfache geometrische Figuren wie z.B. Striche, Kreuze, Kreise oder Vierecke verwendet. Untersuchungen mit solchen Objekten sind gut geeignet, um generelle Aussagen und Abschätzungen zur quantitativen Limitierung des VSTM zu machen, geben aber wenig Aufschluss darüber, wie wir das visuelle Arbeitsgedächtnis in alltäglichen Aufgabestellungen nutzen, in denen ein Bezug der Objekte zur Aufgabe selbst besteht, bzw. in denen unterschiedliche Objekte unterschiedlich wichtig sein können. Zweitens gibt

bisher leider nur wenige Untersuchungen zum VSTM in dynamischen Paradigmen. Ein zentraler Aspekt dieser Diplomarbeit war es daher, ein geeignetes Paradigma zu finden und in einer Pilotstudie zu testen, das folgende Anforderungen erfüllen sollte:

1. Eine dynamische und realitätsnahe Versuchsumgebung.
2. Eine Aufgabenstellung an die Probanden, deren Lösung die Nutzung des VSTM voraussetzt.
3. Eine Möglichkeit zur Abfrage des VSTM-Inhalts während der Durchführung der Aufgabe.

Aus einer ebenfalls am Lehrstuhl für kognitive Neurowissenschaft durchgeführten Patientenstudie [Pap] war ein Paradigma bekannt, dass diese Nutzung des VSTM wenigstens stark vermuten ließ. In diesem „Kreuzungsparadigma“ wurde die Leistung von Patienten mit permanenten partiellen Gesichtsfeldausfällen in einer Unfallvermeidungsaufgabe in virtueller Realität untersucht. Dabei fuhren die Probanden auf eine Querstraße zu und die Aufgabe bestand darin, diese zu überqueren, ohne mit dem Querverkehr zu kollidieren. Über die VSTM-Nutzung während der Lösung dieser Aufgabe wurden drei Hypothesen formuliert:

1. Es findet keine Nutzung des VSTM statt. (Dies würde bedeuten, dass die Aufgabe nach einem einfachen Regelkreis-Prinzip gelöst werden würde, d.h. Betrachtung eines Autos A -> Reaktion auf Geschwindigkeit und Position von Auto A -> Betrachtung von Auto B -> Reaktion auf Geschwindigkeit und Position von Auto B -> ... usw. Insbesondere wäre es in diesem Fall praktisch nicht möglich, aus verschiedenen Richtungen kommende Autos (bzw. Verkehrslücken) aufeinander abzustimmen.)
2. Ein bestimmter Anteil des Querverkehrs wird im VSTM repräsentiert. (Die wahrscheinlichste Hypothese. Vermutlich ist es nötig, die Geschwindigkeit und Position von mehreren Autos zu integrieren, um die Aufgabe der Kollisionsvermeidung gut lösen zu können.)
3. Die gesamte Verkehrssituation wird im VSTM repräsentiert. (Die vollständige Repräsentation der Verkehrssituation würde natürlich durch die Informationsmaximierung optimalen Voraussetzungen für die Aufgabenstellung bieten. Dagegen sprachen die generell bekannte Limitierung des VSTM, sowie die Theorie des externen Speichers (s. Kapitel 1.2), aber dies galt es zu herauszufinden.)

Nicht ganz trivial war die Art der Messung des VSTM-Inhalts. Um den jeweilig aktuellen Zustand des VSTMs zu ermitteln, sollte den VPen die Möglichkeit gegeben werden die Verkehrssituation zu rekonstruieren (vgl. Kondition A in Kapitel 2.1.2). Dies erschien zunächst als die naheliegendste Möglichkeit, um den Anteil der Verkehrssituation, den die VPen während der Kollisionsvermeidung intern repräsentiert hatten, zu überprüfen. Dabei waren die spezifischen Eigenschaften des VSTM (s. Kapitel 1.2) zu berücksichtigen.

Die verwendete Art der Abfrage - Rekonstruktion durch Positionieren einzelner Autos (s. Kapitel 2.1.2) - bietet sowohl Vor- als auch Nachteile und kann natürlich auch kritisch betrachtet werden. Alternativen für die Abfrage des VSTM-Inhalts könnten in Folgeexperimenten getestet und verglichen werden (s. Kapitel 5).

In der Diplomarbeit sollten folgende zentrale Fragen beantwortet werden:

1. Ist das Paradigma / die Aufgabenstellung grundsätzlich zur Untersuchung des VSTM-Inhalts geeignet?
2. Ist der Schwierigkeitsgrad / die Anforderung an die Probanden angemessen und nicht zu hoch?

Falls Fragen 1 und 2 positiv beantwortet werden konnten:

3. Wo liegt die Obergrenze für die Anzahl von Objekten im VSTM in diesem Paradigma?
4. Wie gut / genau ist die Repräsentation der einzelnen Objekte?
5. Welchen Einfluss auf die Auslastung des VSTMs hat die Aufgabenstellung (Kollisionsvermeidung)?
6. Welchen Einfluss haben die verschiedenen Versuchsparameter (z.B. Fahrtrichtung / Farbe / Größe der Autos)?
7. Schließlich soll die Frage beantwortet werden, ob das Paradigma in der verwendeten Form geeignet ist für zukünftige Studien, bzw. an welcher Stelle es abgeändert oder erweitert werden könnte.

KAPITEL 2

Material und Methoden

2.1 Das Paradigma

2.1.1 Aufbau und Überblick

Zunächst zum grundsätzlichen Aufbau des Experiments. Die virtuelle Welt, in der die Probanden die entsprechenden Aufgaben lösen mussten, besteht im Wesentlichen aus zwei Straßen, die sich senkrecht kreuzen (s. Abbildung 2.1). Beide Straßen waren jeweils an beiden Enden durch Tunnel begrenzt.

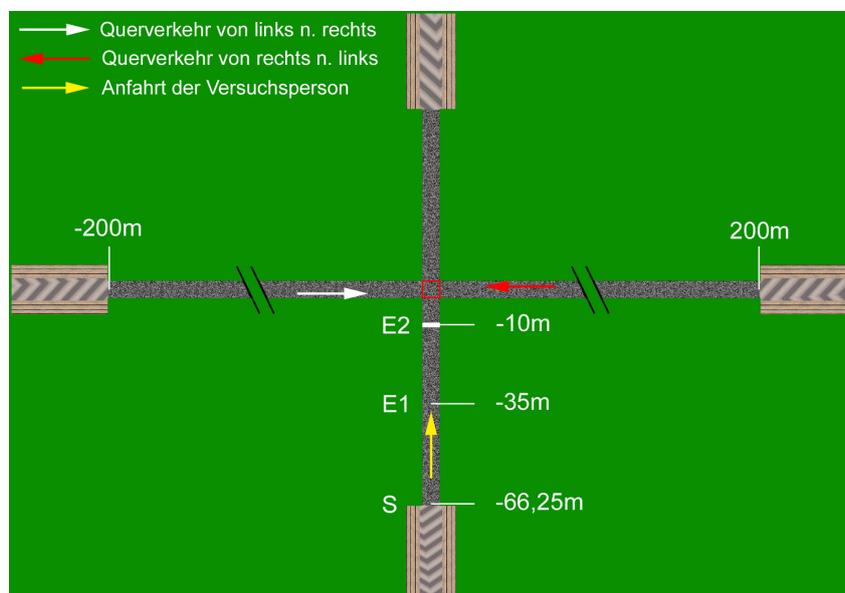


Abbildung 2.1: Die virtuelle Welt aus der Vogelperspektive: die Pfeile geben die Fahrrichtungen der VP und des Querverkehrs an. Das rote Quadrat markiert den Kreuzungsbereich, den die VPen passieren mussten, ohne mit einem Auto des Querverkehrs zu kollidieren. Die Tunnel an den vier Enden der beiden Straßen geben den maximal einsehbaren Bereich der Querstraße vor. S: Startpunkt, E1 : Endpunkt 1 für Kondition A, E2: Endpunkt für Kondition B (s. Kapitel 2.1.2)

Die Probanden fuhren in Ego-Perspektive vom Startpunkt S aus entlang der vertikalen Straße (nach oben in der Aufsicht) auf die Kreuzung zu. Die horizontale Straße (Querstraße) wurde von Querverkehr befahren. Die in Abbildung 2.2 dargestellten Autos des Querverkehrs hatten folgende Eigenschaften:

1. Konstante Geschwindigkeit: 50km/h,
2. Drei Fahrzeuggrößen: 5m, 7,5m und 10m,
3. Alle von links kommenden Autos waren weiß, alle von rechts kommenden rot.

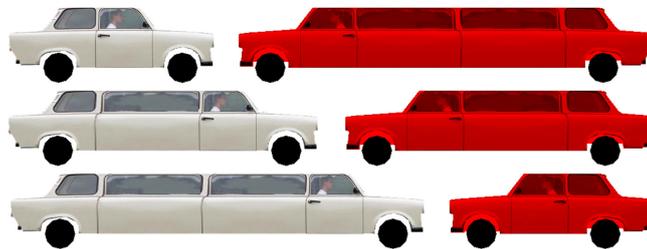


Abbildung 2.2: BILD - Autos

Alle während eines Durchgangs durch die VPen sichtbaren Autos wurden als Verkehrssituation zusammengefasst. Eine Verkehrssituation kann vollständig beschrieben werden durch:

1. Einen Startpunkt pro Fahrtrichtung,
2. Die Folge der Abstände zwischen den Autos,
3. Die Reihenfolge der Größen.

Es wurden zunächst viele verschiedene mögliche Verkehrssituationen getestet. Für den Versuch wurden aus diesen dann 20 Verkehrssituationen ausgewählt, die später ausschließlich verwendet wurden. Diese ausgewählten Verkehrssituationen unterschieden sich untereinander hinsichtlich der Verkehrsdichte und somit des Schwierigkeitsgrads. Alle Verkehrssituationen hatten jedoch per Konstruktion gemeinsam, dass es ohne Einfluss durch die VP immer zu einer Kollision kommen würde.

Jede der 20 Verkehrssituationen wurde in je drei unterschiedlichen Konditionen präsentiert (s. Kapitel 2.1.2), was zu einer Gesamtzahl von 60 Durchgängen pro VP führte. Diese 60 Durchgänge wurden unter Randomisierung der Verkehrssituation, sowie der drei Konditionen angeboten (diese randomisierte Reihenfolge wurde einmalig vor Beginn der Messungen erstellt und zwischen den VPen nicht mehr verändert).

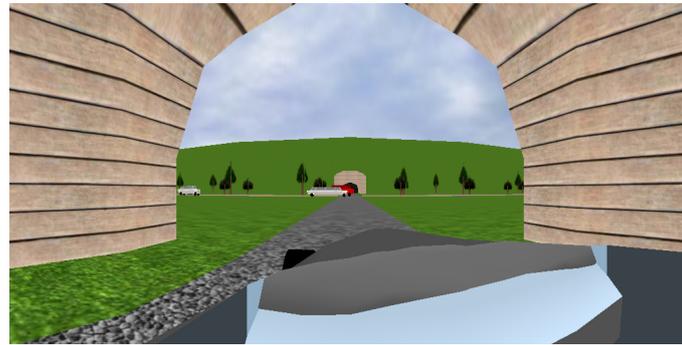
2.1.2 Ablauf eines Versuchsdurchgangs

Ein Durchgang entsprach einer Anfahrt auf die Kreuzung, die sich jeweils aus einer passiven und einer aktiven Phase zusammensetzte.

Teil 1: Die „passive“ Anfahrt

Während der ersten Phase fuhr der Proband mit einer festen Geschwindigkeit von 30km/h vom Startpunkt S (s. Abbildung 2.1) auf die Kreuzung zu bis zum Punkt E1. Er hatte keine Möglichkeit zu interagieren. Er konnte jedoch bereits den Kreuzungsbereich einsehen und den Querverkehr beobachten. Die beiden Wegstrecken \overline{SB} und \overline{BE} (siehe Abb.) wurden so gewählt, dass man sich bereits während dieser Phase auf den Querverkehr konzentrieren musste, um potentielle Kollisionen optimal vermeiden zu können. Es handelte sich also um eine passive Phase hinsichtlich der Interaktion, in der man allerdings aktiv beobachten sollte, um die gestellte Aufgabe möglichst gut lösen zu können.

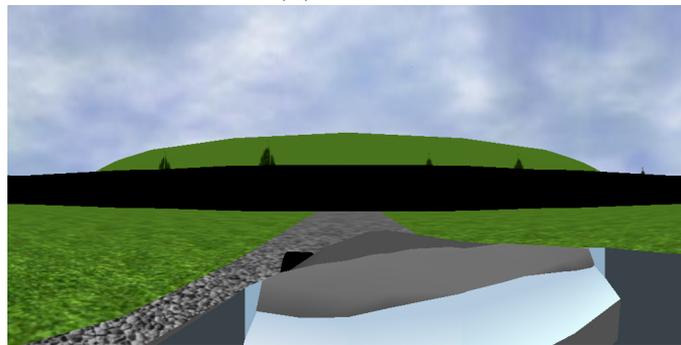
Das Ende dieser Phase wurde dem Probanden durch eine Überblendung der Autos des Querverkehrs mittels eines schwarzen Balken angezeigt. Diese Überblendung hatte eine Dauer von 333ms. Abbildung 2.3 zeigt ein Bild von der Sicht des Probanden auf die Kreuzung in 3 Situationen: (a) vom Startpunkt aus, (b) während der passiven Anfahrt und (c) während der Überblendung des Querverkehrs.



(a) Start



(b) Anfahrt



(c) Überblendung

Abbildung 2.3: Die „passive“ Anfahrt.

Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, hatten die Probanden während der passiven Anfahrtsphase uneingeschränkte Sicht auf den gesamten Querverkehr.

Teil 2: Die Interaktionsphase

In der zweiten Phase der Anfahrt gab es drei unterschiedliche Konditionen. Kondition A diente der Abfrage des VSTM-Inhalts. Konditionen B und B' dienen als Kontroll-Konditionen.

Die Unterscheidung der Konditionen war frühestens ab der Überblendung des Querverkehrs möglich, denn in Kondition A blieb das Auto des Probanden mit Beginn dieser Überblendung am Punkt E1 (s. Abbildung 2.1) stehen und die Perspektive des Probanden

verblieb für den Rest des Durchgangs von diesem Punkt aus, während die VPen in den Konditionen B und B' auch während der Überblendung weiter durch die virtuelle Welt in Richtung der Kreuzung fuhren.

Kondition A - Rekonstruktion (Abfrage des Inhalts des Arbeitsgedächtnisses)

In dieser Kondition wurde der Inhalt des Arbeitsgedächtnisses abgefragt. Dazu bestand die Aufgabe der VPen darin, die zuletzt (vor der Überblendung) gesehene Verkehrssituation zu rekonstruieren.

In Kondition A blieb das Auto der VPen mit Beginn der Überblendungsdauer an Punkt E1 (s. Abbildung 2.1) stehen. Die Querstraße wurde leer präsentiert, sämtliche Autos des Querverkehrs waren entfernt worden. Zusätzlich wurden Autos aller Größen als Auswahlpool überhalb der Kreuzung in zwei Spalten angeboten (s. Abbildung 2.4). In der linken Spalte befanden sich die Autos mit Fahrtrichtung nach rechts (weiß), mit zunehmender Größe von oben nach unten. In der rechten Spalte befanden sich in gleicher Anordnung die Autos mit Fahrtrichtung nach links (rot) in der gleichen Reihenfolge.

In der Mitte des Sichtfeldes wurde ein schwarzer Rahmen eingeblendet. Mit Hilfe des Joysticks konnten die Probanden diesen Rahmen zwischen den Autos bewegen und sie durch Drücken des Feuerknopfes auswählen. Wurde ein Auto ausgewählt, so erschien es auf der Kreuzung in der Mitte der Querstraße. Dieses Auto konnte nun, wiederum mit dem Joystick, auf der Straße nach links und rechts verschoben und durch erneutes Drücken des Feuerknopfes positioniert werden. Wurde diese Auswahl und Positionierung einmal abgeschlossen, so erschien wieder der Auswahlrahmen und der Proband konnte mit der Positionierung des nächsten Autos fortfahren.

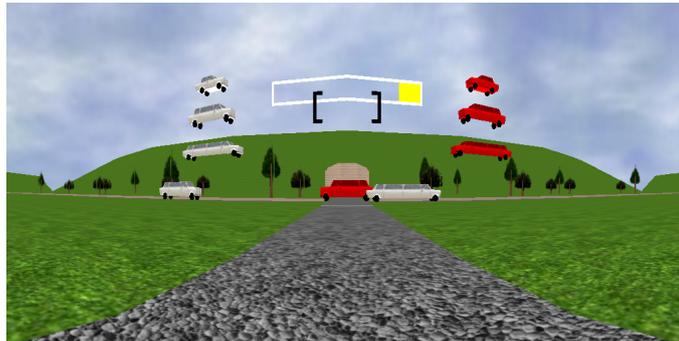


Abbildung 2.4: Ansicht während der Positionierungsphase der Rekonstruktionskondition. Mit dem Joystick konnte der schwarze Rahmen innerhalb des Autopools überhalb der Querstraße bewegt werden und durch Drücken des Feuerknopfes ein Auto ausgewählt werden. Das ausgewählte Auto konnte dann auf der Querstraße verschoben und abgestellt werden.

Am oberen Rand der Leinwand wurde während dieser Phase ein Zeitbalken eingeblendet, der innerhalb von 30s ablief. Die Setzphase wurde entweder beendet, wenn der Proband angab, kein Auto mehr setzen zu wollen, oder spätestens mit Ablauf des Zeitbalkens. Diese Obergrenze wurde im Hinblick auf die zeitliche Begrenzung der Speicherdauer im VSTM eingeführt, um eine zügige Wiedergabe des Inhalts durch die Probanden zu

erreichen (und eventuelles Raten nach längerer Zeit zu verhindern). Außerdem sollte durch die zeitliche Begrenzung eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den VPen geschaffen werden.

Im Anschluss an die Setzphase folgte eine Korrekturphase (s. Abbildung 2.5), in der die VPen die Möglichkeit hatten, die Positionen bereits gesetzter Autos zu korrigieren. Dazu konnten diese mit dem Joystick erneut ausgewählt, entlang der Querstraße verschoben und an der korrigierten Position abgesetzt werden. Dadurch konnten auch Autos kenntlich gemacht werden, die unabsichtlich gesetzt wurden, oder nach dem Setzen als falsch erkannt wurden (zum Beispiel falsche Größe). Um ein Auto zu entfernen, waren die Probanden angewiesen, es aus ihrem Sichtbereich der Querstraße zu schieben. Entsprechend markierte Autos wurden nicht ausgewertet. Auch diese Korrekturphase unterlag einer zeitlichen Begrenzung, die erneut durch einen Zeitbalken kenntlich gemacht wurde. Das Zeitlimit lag in diesem Fall bei 20 Sekunden.

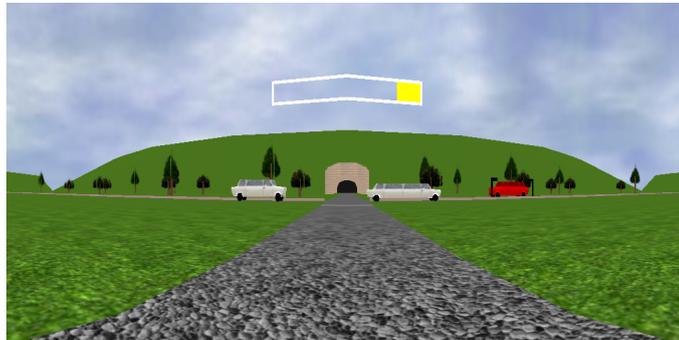


Abbildung 2.5: Ansicht während der Korrekturphase der Rekonstruktionskondition. Die Positionen der in der Positionierungsphase gesetzten Autos konnten korrigiert werden, indem sie mit dem Joystick ausgewählt, verschoben und erneut abgesetzt werden konnten.

Den Probanden wurde generell angeboten, einen Positionierungsdurchgang abzubrechen um unnötige Wartezeiten zu vermeiden, wenn sie der Meinung waren alle memorierten Autos gesetzt zu haben und keine (weitere) Korrektur durchführen wollten.

Kondition B - Kollisionsvermeidung

In Kondition B bestand die Aufgabe der VPen darin, potentielle Unfälle zu vermeiden. Die Probanden konnten dazu mit dem Joystick die Geschwindigkeit stufenlos zwischen 15km/h und 50km/h verändern (Joystick nach vorne = schneller, Joystick nach hinten = langsamer). Wenn sich der Joystick in der Ausgangsposition befand, fuhren sie mit einer Grundgeschwindigkeit von 30km/h.

Jede der 20 Verkehrssituationen war so gewählt, dass es zu einer Kollision kam, wenn der Proband die Geschwindigkeit nicht veränderte, also den Joystick gar nicht bewegte. Es war also immer eine Interaktion nötig, um die Aufgabe zu erfüllen. Mit der Verkehrsdichte variierte der Schwierigkeitsgrad dieser Aufgabe zwischen den Verkehrssituationen.

Während Kondition B in der VP-Instruktion als Hauptaufgabe beschrieben wurde, war sie messtechnisch gesehen eine Kontrollkondition.

Kondition B' - Kollisionsvermeidung (Variante)

Kondition B' unterscheidet sich von Kondition B nur in einem Detail: Das jeweils erste Auto, mit dem der Proband bei Beibehaltung der Grundgeschwindigkeit von 30km/h kollidieren würde, wurde für jede Verkehrssituation berechnet. In Kondition B' wurde während der Überblendung nun genau dieses Auto um 3° (von der aktuellen Position des Probanden - E1 - gesehen) in Fahrtrichtung versetzt.

Der Versatz wurde dabei mit 3° sehr gering gewählt, da er den VPen nicht auffallen sollte. Die Kondition B' sollte sich augenscheinlich nicht von Kondition B unterscheiden und die VPen wurden auch im Vorfeld des Experiments nicht darüber aufgeklärt, dass diese Kondition in manchen Durchgängen präsentiert werden würde. Die VPen wurden jedoch nach Versuchsende befragt (s. Appendix B - Fragebogen), ob Ihnen aufgefallen war, dass in manchen Durchgängen ein Auto versetzt wurde.

Kondition B' wurde nur hinsichtlich einer möglichen zukünftigen Fragestellung in das Experiment aufgenommen, diente aber ansonsten als reines Kontrollexperiment und ist aus Sicht der Probanden mit Kondition B gleichzusetzen.

2.2 Erzeugung und Darstellung der experimentellen Umgebung

Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, war die realitätsnahe Darstellung der Versuchsumgebung ein primäres Ziel. Dessen Umsetzung setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der Erzeugung (s. Kapitel 2.2.1) der virtuellen Umgebung mit OpenGL *PerformerTM*, sowie der Darstellung (s. Kapitel 2.2.2) des Paradigmas auf einer großflächigen Leinwand zur Stimulierung des (annähernd) gesamten Gesichtsfelds der VPen. Die Kombination der großflächigen Präsentation mit einer realistischen Umgebung sollte bei den Probanden einen stärkeren Immersions-Eindruck [SV05] erwecken.

Sowohl die Stimuluserzeugung und -präsentation, als auch sämtliche Messungen erfolgten synchronisiert mit einer Frequenz von 60Hz. Weitere Informationen folgen in den entsprechenden Kapiteln.

2.2.1 Erzeugung

Die Programmierung des Experiments, sowie der virtuellen Umgebung erfolgte mit C++, unter Verwendung der graphischen Programmierschnittstelle OpenGL *PerformerTM*, die auf dem OpenGL© Standard aufbaut. Die von OpenGL *PerformerTM* produzierten Einzelbilder wurden mit einer Frequenz von 60Hz generiert und an die beiden Ausgänge der Graphikkarte (NVIDIA Quadro4 980XGL) ausgegeben. Zur Generierung und Bearbeitung der Modelle (z.B. die 3D-Welt, Fahrzeuge, Bäume, etc.), aus denen mit OpenGL *PerformerTM* die Versuchsumgebung aufgebaut wurde, kam das Programm *MultiGen Creator* von MultiGen Paradigm, Inc. zum Einsatz.

2.2.2 Darstellung

Zur Präsentation des visuellen Stimulus wurde ein am Lehrstuhl für kognitive Neurowissenschaft etabliertes System [Pap] - bestehend aus einer gebogenen und nach hinten geneigten Leinwand, sowie 2 Beamern und einem Graphikrechner - benutzt. Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über die Anordnung und Größenverhältnisse des Setups.

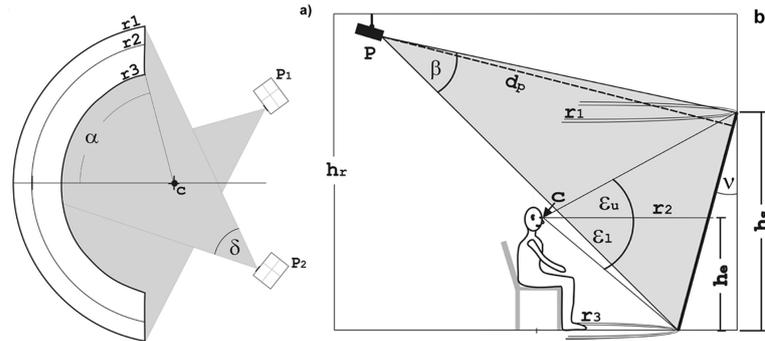


Abbildung 2.6: Schematische Übersicht über das Leinwand-Setup zur Darstellung des Paradigmas. (a) Ansicht von oben. (b) Ansicht von der Seite. c : Zentrum des Kegelstumpfsegmentes, $\alpha = 75^\circ$: rechtes horizontales Gesichtsfeld (gesamt $2 \times \alpha = 150^\circ$), $r_1 = 1,83\text{m}$: Radius des Kegelstumpfsegmentes an der oberen Kante, $r_2 = 1,62\text{m}$: Radius des Kegelstumpfsegmentes in Augenhöhe ($h_e = 1,2\text{m}$), $r_3 = 1,29\text{m}$: Radius des Kegelstumpfsegmentes an der unteren Kante, P_1 und P_2 : die beiden Beamern zur Projektion des Paradigmas auf die Leinwand, $\delta = 47^\circ$: horizontaler Ausfallwinkel der Beamern, $\beta = 35^\circ$: vertikaler Ausfallwinkel der Beamern, $\epsilon_u = 24^\circ$: oberes vertikales Gesichtsfeld, $\epsilon_1 = 43^\circ$: unteres vertikales Gesichtsfeld, $\eta = 15^\circ$: Neigung der Leinwand.

Kernbestandteil dieses Systems war die Projektionsleinwand, deren geometrische Form einem Kegelstumpsegment von 150° , mit einem oberen Radius von $1,83\text{m}$ und einem unteren Radius von $1,29\text{m}$ entsprach. Die Neigung der Leinwand betrug 15° bei einer Gesamthöhe von 2m . Das resultierende Gesichtsfeld umfasste 150° horizontal und 67° vertikal.

Das Bild wurde von zwei Beamern vom Typ Sanjo PLC-XU46, mit einer Auflösung von jeweils 1024×768 , auf die Leinwand projiziert. Da die generierten planaren Einzelbilder auf der gekrümmten Leinwand verzerrt erscheinen würden, wurde jedes Einzelbild vor der Projektion mit einer speziell für die Leinwand entwickelten Verzerrungsroutine bearbeitet. Die in mehreren Schritten arbeitete. Zunächst wurde ein virtuelles 3D-Modell der Leinwand erstellt. Dann wurde das aktuelle Einzelbild als Textur umgewandelt. Schließlich wurde diese Textur auf die virtuelle Leinwand gelegt und als neues Einzelbild das Abbild dieser texturierten Leinwand ausgegeben.

Die verzerrte Szene wurde von zwei virtuellen Kameras betrachtet, deren Position und Ausrichtung in der virtuellen Welt der der Beamern bezüglich der Projektionsleinwand entsprachen. Die Perspektive dieser Kameras entsprach dem Bild, das von den Beamern auf die Leinwand projiziert wurde. Vor den Linsen der Beamern waren seitlich Blenden angebracht, um einen Teil des Überlappungsbereichs der beiden Beamern zu verdecken

[Hardiess2008]. Die endgültige Projektion hat eine Auflösung von 2048×768 Pixeln.

In Abbildung 2.7 zeigt das Leinwand-Setup im VR-Labor des Lehrstuhls für kognitive Neurowissenschaft mit Proband.

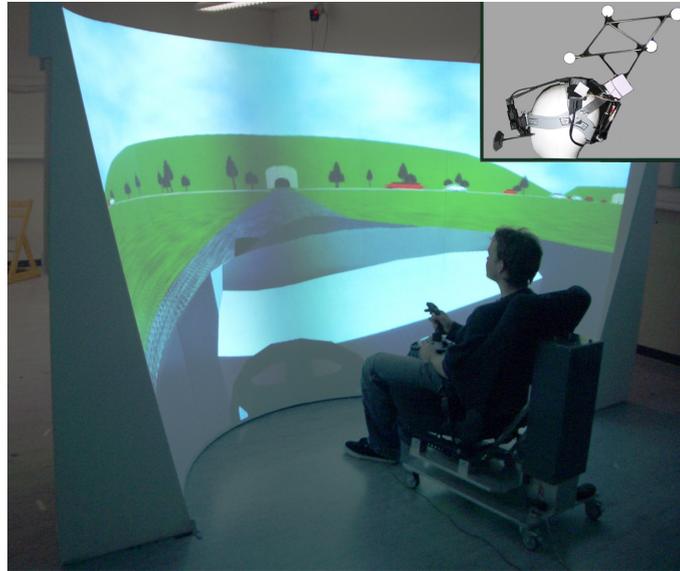


Abbildung 2.7: Um die Dimensionen abschätzen zu können wird hier ein Photo der Leinwand gezeigt. Der Proband sitzt auf einem höhenverstellbaren Stuhl, so dass sich seine Kopf über dem Zentrum des Kegelstumpfsegments befindet und die Augenhöhe 1,2m beträgt (vgl. Abbildung 2.6). Rechts oben wird ist der Eyetracker mit Headtracking-Target zu sehen (s. Kapitel 2.3.1 bzw. 2.3.2)

2.3 Messung von Kopf- und Augenbewegungen

Wie aus bisherigen Studien hervorgeht [Zitate...], sind Blickbewegungen und der damit verknüpfte Aufmerksamkeitsfokus mitentscheidend für die Befüllung und Überschreibung des VSTM. Um entsprechende Analysen zu ermöglichen wurden während des Experiments bei allen VPen die Augenbewegungen gemessen. Die dafür verwendeten Messsysteme werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.3.1 Messung der Augenbewegungen

Die VPen trugen während des Experiments den Infrarotlicht-basierten Eyetracker 'Model 501' der Applied Science Laboratories (ASL), Bedford, USA.

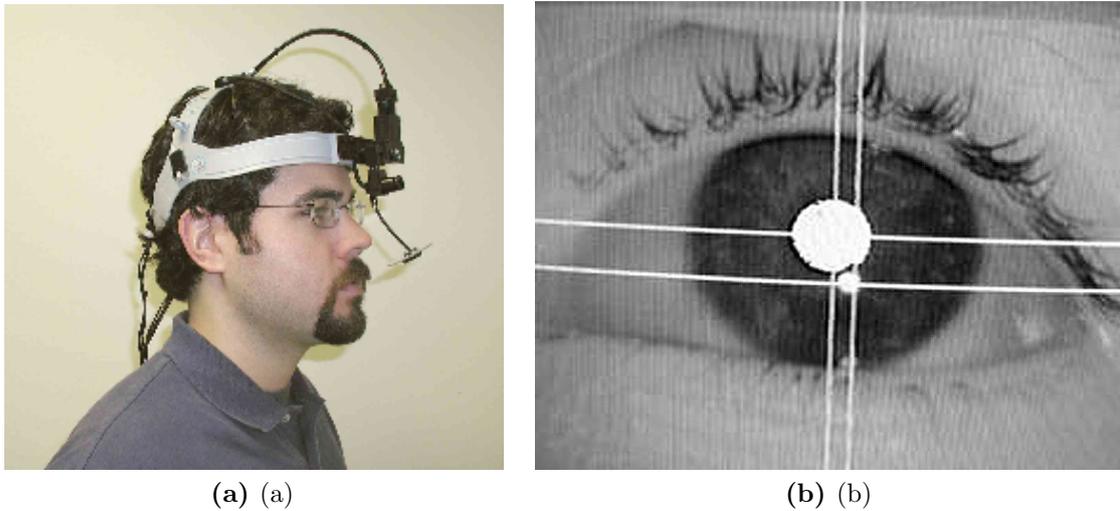


Abbildung 2.8: (a) Seitenansicht des Eyetrackers. (b) Der von der Eyetracker-Software verwendete Algorithmus berechnet die Blickrichtung aus der Stellung der Pupille und einer Cornea-Reflexion zueinander.

Das System basiert auf einer¹ Infrarotkamera, sowie einer Infrarot-Licht-Quelle, die beide an einem Helm montiert und stirnseitig senkrecht nach unten ausgerichtet sind (s. Abbildung 2.8 (a)). Der Helm ist weiterhin mit einem semipermeablen Spiegel (Visor)² ausgerüstet, der so eingestellt werden kann, dass die Lichtstrahlen der Infrarot-Licht-Quelle auf die Pupille umgelenkt werden, und entsprechend reflektierte Strahlung zurück in die Kamera gelenkt wird. Ebenso können Fokus und Ausrichtung der Kamera (und der Lichtquelle) innerhalb gewisser Grenzen an die VP angepasst werden³.

Ein mitgeliefertes Hardware- und Softwarepaket berechnet mit einer Frequenz von 60Hz die Position der Pupille, sowie einer Cornea-Reflexion aus dem Bild der Infrarotkamera.

Aus diesen Positionsdaten wird unmittelbar die aktuelle Blickrichtung der VP, relativ zu einer vor Messbeginn stattgefundenen Kalibrierung, berechnet. Der Helm muss daher vor Messbeginn über eine Stellschraube am Kopf fixiert werden, sodass ein Verrutschen des Helms und damit der Messapparatur auf dem Kopf minimiert, bzw. bestenfalls verhindert wird.

Die so gewonnen Daten liefern die aktuelle Blickrichtung (in Relation zu einer vor

1 Dieses Messsystem erlaubt das Tracken **eines** Auges. In dieser Studie wurde immer das linke Auge getrackt.

2 Der Visor reflektiert Infrarot-Licht, ist aber durchlässig für sichtbares Licht, sodass die Probanden durch den im Sichtfeld befindlichen Spiegel kaum bis gar nicht eingeschränkt werden.

3 Der Winkel der Kamera im Verhältnis zum Helm kann um wenige Grad nach vorne, also weg vom Auge verstellt werden. Dies kann aus praktischen Gründen eine Rolle spielen, zum Beispiel wenn eine VP sehr hervorstehende Wimpern hat. Bei einem zu steilen Kamerawinkel (der Weg der Lichtstrahlen geht dann fast senkrecht nach unten auf den Visor, und führt nach der Reflexion von diesem ebenso fast senkrecht zurück nach oben ins Auge) können die Wimpern schlichtweg im Weg sein, das heißt sie verdecken die Pupille ganz oder teilweise, sodass der Algorithmus des Eyetrackers nicht mehr zuverlässig arbeiten kann.

Messbeginn vorgenommenen Kalibrierung) der VP mit einer Genauigkeit von ca. 2° und einer zeitlichen Verzögerung von maximal 50ms.

2.3.2 Messung der Kopfbewegungen

Durch die oben beschriebene Technik wurden Augenbewegungen relativ zum Kopf gemessen. Damit die Probanden ihren Kopf frei im Raum bewegen können¹, muss also auch die Position des Kopfes im Raum zu jeder Zeit bekannt sein. Dazu verwendeten wir das ebenfalls Infrarotlicht-basierte Trackingsystem ARTtrack/DTrack der A.R.T. GmbH, Weilheim, Deutschland.

Mit Hilfe von sechs Infrarot-Kameras wurde die Position eines geometrischen Körpers aus vier reflektierenden Kugeln, die starr miteinander verbunden sind, ermittelt. Dieser Kugel-Körper war wiederum fest mit dem Helm des Eyetrackers, und somit mit dem Kopf des Probanden, verbunden (s. Abbildung 2.7). Diese Messung lieferte 6 Freiheitsgrade² mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ$ und einer maximalen zeitlichen Verzögerung von 40ms. Gemessen wurde auch hier mit einer Frequenz von 60Hz.

2.4 Probanden

Das Experiment wie in Kapitel 2.1 beschrieben (im folgenden als „Studie A“ bezeichnet) wurde mit insgesamt 19 Probanden durchgeführt. Bei einer Probandin konnten aufgrund technischer Einschränkungen keine Augenbewegungen gemessen werden.

Außerdem wurde von Jan Hirschmann, einem Masterstudent der Graduate School of Neural & Behavioural Sciences, im Zuge meiner Diplomarbeit ein Zusatzexperiment mit 15 Probanden durchgeführt, in dem er den Einfluss der Überblendungsdauer (s. Kapitel 2.1.2) untersuchte (im folgenden „Studie B“). Das Experiment in Studie B war stark an das Experiment aus Studie A angelehnt. Es wurden sieben Verkehrssituationen aus Studie A ausgewählt, in denen Kondition A nun je drei mal mit verschiedenen Überblendungsdauern (1s, 5s und 30s) präsentiert wurde. In 39 weiteren Durchgängen wurde Kondition B präsentiert. Sowohl die Konditionen A und B, als auch die Überblendungsdauer waren über die insgesamt 60 Durchgänge randomisiert. Während der Überblendung mussten die Probanden wiederholt von 1 bis 10 zählen, um eine sprachliche Konsolidierung der VSTM-Inhalts während der verlängerten Überblendungsdauer zu verhindern. In Studie B wurden keine Augenbewegungen gemessen.

1 Dies sollte natürlichere Versuchsbedingungen schaffen. Die Alternative zum Headtracking wäre die Fixation des Kopfes gewesen, was nicht nur zu einem eingeschränkten Freiraum der VP geführt hätte, sondern darüber hinaus noch weitere Effekte hätte haben können (da die Fixierung des Kopfes für Probanden normalerweise extrem ungewohnt ist), deren Einfluss bei der Auswertung u.U. nicht mehr nachvollziehbar gewesen wäre.

2 x-, y- und z-Position sowie Rotation des Kugelkörpers um die drei Achsen in Raumkoordinaten.

2.5 Experimentdurchführung

Die gesamte Versuchsdurchführung dauerte pro VP zwischen 50 und 90 Minuten. Die Versuchsdurchführung gliederte sich in die Vorbereitung der VP (Instruktion, Training, Kalibrierung der Messsysteme), sowie den eigentlichen Versuch. Außerdem erklärten die VP vor Beginn des Experiments ihr Einverständnis sowie ihre Zurechnungsnahme des möglichen Auftretens von Schwindelgefühlen - in Folge der Präsentation des Experiments auf der Leinwand - mit ihrer Unterschrift.

2.5.1 Instruktion

Vor Beginn des Experiments erhielten die Probanden in schriftlicher Ausführung eine Beschreibung (s. Appendix A - Instruktion) des bevorstehenden Experiments, sowie der Aufgaben die sie darin lösen sollten. Sie wurden gebeten, die Beschreibung in ihrem eigenen Tempo durchzugehen und Zwischenfragen zu stellen, falls etwas unklar oder unverständlich sein sollte. Die schriftliche Form der Instruktion wurde gewählt, sodass die Probanden ihre Lesegeschwindigkeit selbst bestimmen konnten und beispielsweise einen Absatz mehrfach lesen, falls es zu Verständnisproblemen kam. Ergänzt wurde die Instruktion durch die Ermunterung, Fragen zu stellen, sowie ergänzende mündliche Erklärungen und Hinweise auf die wichtigen Eckpunkte im weiteren Verlauf der Vorbereitung.

2.5.2 Kalibrierung der Messsysteme

Vor Versuchsbeginn mussten das Eye- und das Headtrack-System kalibriert werden, da die von ihnen gelieferten Messergebnisse jeweils relativ zum durch die Kalibrierung festgelegten „Nullpunkt“ angegeben sind.

Während der Kalibrierung saß die VP dazu bereits vor der Leinwand und trug den Eyetracking-Helm mit dem daran unbeweglich befestigten Headtracking-Objekt. Der Stuhl war mit Rollen versehen und höhenverstellbar. Wenn die VP gerade und bequem saß wurde der Stuhl so positioniert bzw. eingestellt, dass die Augenhöhe der VP 1,20m betrug und sich ihr Kopf im Zentrum des Kegelstumpfes befand, der durch die Leinwand angedeutet wird. Da die VP zur Kalibrierungsmessung den Kopf sehr still halten musste, wurde unterstützend eine Kinnstütze¹ verwendet. Dann erfolgte die Kalibrierung des Headtrackers durch Messung der Position des Headtracking-Objekts in dieser Stellung.

Das Ziel der Messungen war, die Blickbewegungen, bzw. Fixationspunkte der VP während der Versuchsdurchführung zu berechnen. Daher wurde dann einmalig der Versatz zwischen dem Trackingobjekt und den Augen des Probanden gemessen, da nicht die Position des Kopfes, bzw. dieses Trackingobjekts, sondern die Position der Augen der VP im Raum den Berechnungen zugrunde liegen sollte. Zur Ermittlung des Versatzes hielt sich der Proband eine weitere einzelne reflektierende Kugel, die an einem Stab befestigt

¹ Ein Stativ mit einem schwenkbaren Ausleger, an dessen Ende eine gepolsterte Vertiefung angebracht wurde, so dass die VPen ihre Kopf aufliegen konnten.

war, an die Nasenwurzel¹. Durch eine einmalige Messung konnte anschließend Länge und Richtung des Vektors bestimmt werden, der vom Mittelpunkt des Trackingobjekts zur Nasenwurzel zeigte. Dieser Vektor wurde dann bei der Berechnung der Augenposition entsprechend berücksichtigt.

Die Repräsentation der Blickrichtung in der Eyetracker-Software ist durch eine zweidimensionale Karte mit 241×261 Punkten ($x \times y$) realisiert. Zur Kalibrierung des Eyetrackers wurde ein Rechteck aus 3×3 Punkten auf die Leinwand projiziert. Die Positionen der neun Punkte auf der Leinwand waren bekannt. Die VP wurde gebeten, den Kopf unbewegt geradeaus zu halten, und mit den Augen die Punkte nacheinander zu fixieren. Pro Fixation wurde eine Messung durchgeführt, wobei jedem der neun Punkte eine x/y -Koordinate auf der virtuellen Karte der Eyetracker-Software zugeordnet wurde.

In jedem Zeitschritt während der späteren Messungen gab die Eyetracker-Software eine x/y -Koordinate aus, die der aktuellen Blickrichtung entsprach. Diese wurde in Bezug zu den x/y -Koordinaten der neun Punkte mit bekannter Position auf der Leinwand interpoliert und somit konnten Azimuth und Elevation der aktuellen Blickrichtung berechnet werden.

Die Ausgabe der Eyetracker-Software war die (x/y)-Koordinate der aktuellen Blickrichtung mit einer Frequenz von 60Hz.

2.5.3 Training

Alle Personen konnten Konditionen A und B so oft üben, bis sie angaben mit der Steuerung zurechtzukommen und die Aufgabe verstanden zu haben. Im Training wurden die beiden Konditionen getrennt angeboten, zuerst Kondition A, dann Kondition B. Die VP führten unterschiedlich viele Trainingsdurchläufe durch, jedoch nie mehr als 15 pro Kondition.

Kondition B' wurde nicht trainiert, da sie sich für die VPen in der Durchführung nicht von Kondition B unterscheidet (s. Kapitel 2.1.2).

1 Dies entsprach nicht exakt der Position des Mittelpunkts zwischen den Augen, die Abweichung betrug jedoch nur wenige Zentimeter und war deutlich geringer als der Versatz zwischen dem Trackingobjekt und den Augen.

KAPITEL 3

Ergebnisse

3.1 Auswertung der Positionierungsdaten Teil A

In Teil A der Auswertung werden Ergebnisse präsentiert, die ohne Berücksichtigung der jeweils dargebotenen Verkehrssituation gewonnen wurden.

Im Folgenden wird mit *Distanz* immer der Abstand der Autos des Querverkehrs zur Kreuzungsmitte bezeichnet. Die Autos des Querverkehrs aus den präsentierten Verkehrssituationen werden mit *Autos_{Q real}* bezeichnet. *Autos_{Q pos*}* steht für die nach Abschluss der Positionierungsphase gesetzten Autos und *Autos_{Q pos}* für die final positionierten Autos, also nach Abschluss der Korrekturphase.

3.1.1 Anzahl positionierter Autos

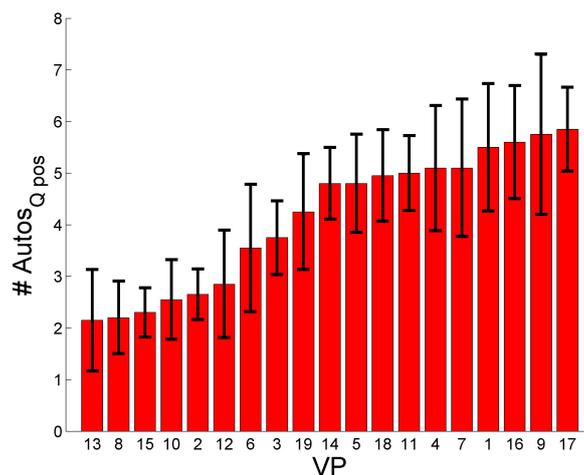


Abbildung 3.1: Vergleich der gemittelten Anzahl gesetzter Autos pro Durchgang zwischen den Versuchspersonen.

Anhand einer einfaktoriellen ANOVA (Faktor: VPen, abhängige Variable: # Autos_{Q pos}) konnte ein signifikanter Unterschied der Anzahl der Autos_{Q pos} zwischen den VPen gezeigt werden ($F(18,361) = 35,9$; $p < 0,001$). Abbildung 3.1 verdeutlicht die Beobachtung und zeigt eine relativ kontinuierliche Verteilung zwischen zwei und mehr als fünf Autos_{Q pos} pro Durchgang.

Studie B hatte das Ziel, den Einfluss der Überblendungsdauer u.a. auf die Setzmenge zu untersuchen. Abbildung 3.2 (a) zeigt dazu einen Vergleich innerhalb der Studie B, sowie mit den Daten aus Studie A. Trotz disjunkter Versuchspersonengruppen und großen Unterschieden hinsichtlich der Verzögerung, bis der VSTM-Inhalt von den Probanden durch das Positionieren wiedergegeben werden konnte, ist die gemittelte Anzahl der Autos_{Q pos} sehr konstant bei einem Wert knapp über vier (Studie A: 4,14 Autos_{Q pos}; Studie B: 4,17 Autos_{Q pos} bei 1s, 4,11 Autos_{Q pos} bei 5s und 4,35 Autos_{Q pos} bei 30s Überblendungsdauer). Eine einfaktorielle ANOVA mit den Faktor Überblendungsdauer ergab keinen signifikanten Unterschied ($F(3,60) = 0,088$; $p = 0.966$).

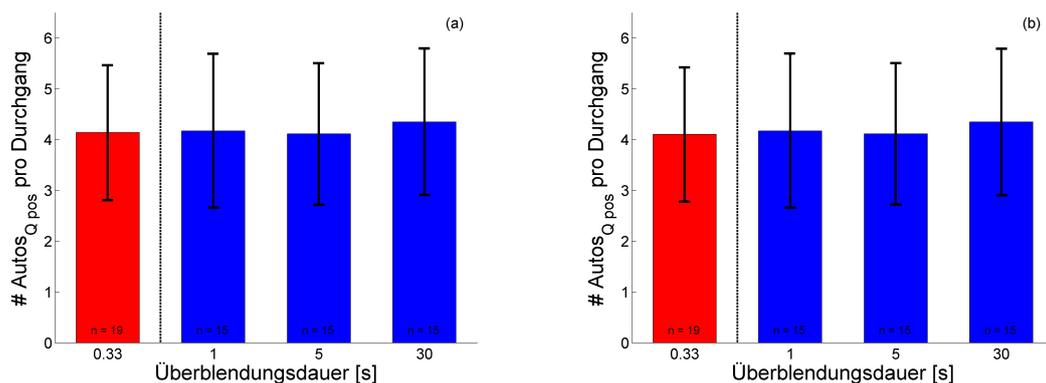


Abbildung 3.2: Anzahl Autos_{Q pos} pro Durchgang in Abhängigkeit der Überblendungsdauer. (a) Vergleich der Studien A (rot) und B (blau). (b) Vergleich der Studien A (rot) und B (blau) unter ausschließlicher Betrachtung der übereinstimmenden Verkehrssituationen.

Um zu überprüfen, ob die 13 zusätzlichen Verkehrssituationen (s. Kapitel 2.4) in Studie A für diesen Effekt verantwortlich sind, wurden für Abb. 3.2 (b) nur die Daten aus Studie A aufgearbeitet, die von genau den sieben Verkehrssituationen stammen, die auch in Studie B präsentiert wurden.

Für diese sieben Verkehrssituationen isoliert betrachtet wurden in Studie A durchschnittlich 4,11 Autos gesetzt. Auch hier ist kein Effekt der Überblendungsdauer auf die Anzahl der Autos_{Q pos} zu erkennen. Eine einfaktorielle ANOVA über den Faktor Überblendungsdauer ergab ebenfalls keinen signifikanten Unterschied ($F(3,60) = 0,103$; $p = 0.96$).

3.1.2 Verteilung der positionierten Autos

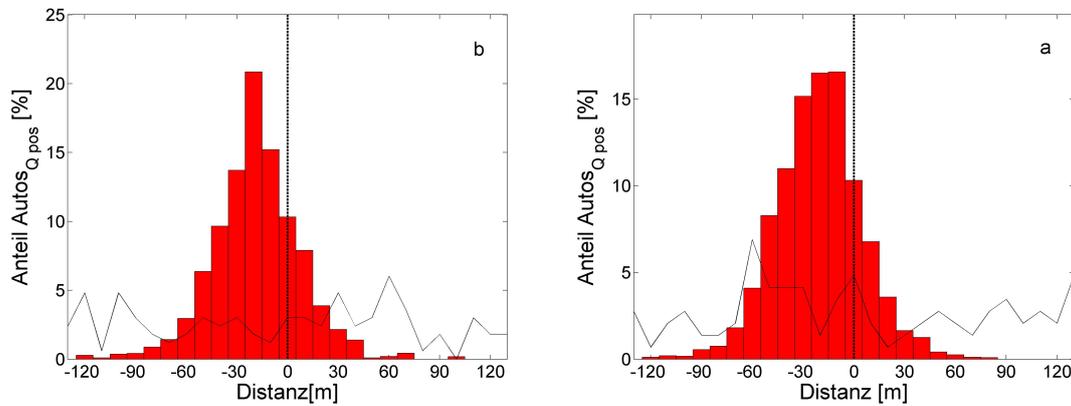


Abbildung 3.3: Histogramm der $\text{Autos}_{Q_{\text{pos}}}$ (rote Balken) nach Fahrtrichtung getrennt ((a) Fahrtrichtung nach rechts, (b) Fahrtrichtung nach links). Die schwarze durchgezogene Linie gibt jeweils die gemittelte Verteilung der $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$ an. Die horizontale Begrenzung bei $\pm 130\text{m}$ ab Kreuzungsmitte ergibt sich aus dem maximalen Sichtbereich der VP zum Zeitpunkt der Positionierung.

Abbildung 3.3 zeigt deutlich, dass hauptsächlich Autos im kreuzungsnahen Bereich (ab ungefähr 50m Distanz in Fahrtrichtung bis zum Kreuzungsmittelpunkt) memoriert wurden. Potentiell unfallgefährlich waren im Fall der Kondition B alle $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$ mit einer Distanz zwischen 130m (bei konstant minimaler Geschwindigkeit der VP) und 25m (bei konstant maximaler Geschwindigkeit der VP) in Fahrtrichtung zum Zeitpunkt des Einsetzens der Überblendung. Bei gleichbleibender Geschwindigkeit von 30km/h wäre es mit $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$ zwischen 72m und 45m vor der Kreuzung zu einer Kollision gekommen. Von den VPen also auch solche $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$ memoriert, die die Kreuzung bereits wieder verlassen hätten, bevor die VP diese hätte erreichen können.

Um die generelle Präferenz für $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$, die sich in Fahrtrichtung vor der Kreuzung befinden, wurden die Daten aller $\text{Autos}_{Q_{\text{pos}}}$, unterteilt nach Vorzeichen des Abstands zur Kreuzungsmitte in Fahrtrichtung, für Abbildung 3.5 zusammengefasst. Der Unterschied der Setzmengen ist signifikant (T-Test: $T(36) = 16,4$; $p < 0.001$).

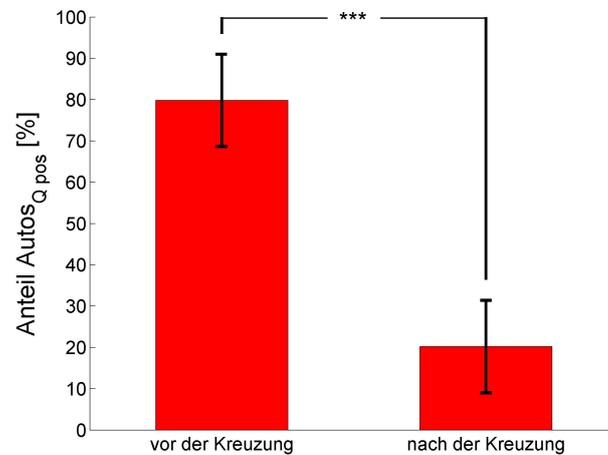


Abbildung 3.4: Prozentuale Verteilung der Autos_{Q_pos} vor und nach der Kreuzung (jeweils in Fahrtrichtung).

3.1.3 Anzahl positionierter Autos in Relation zur Gesamtanzahl vorhandener Autos

Um zu überprüfen, ob die reine Anzahl der Autos_{Q_real} ein mitbestimmender Faktor für die Anzahl Autos_{Q_pos} war, wurden die Verkehrssituationen nach der Anzahl der Autos_{Q_real} in drei Intervalle eingeteilt, wie in Abbildung 3.5 zu sehen. Anhand einer einfaktoriellen ANOVA konnte gezeigt werden, dass die Anzahl der Autos_{Q_real} keinen Einfluss auf die Anzahl der Autos_{Q_pos} hatte ($F(2,377) = 0,648$; $p = 0,524$).

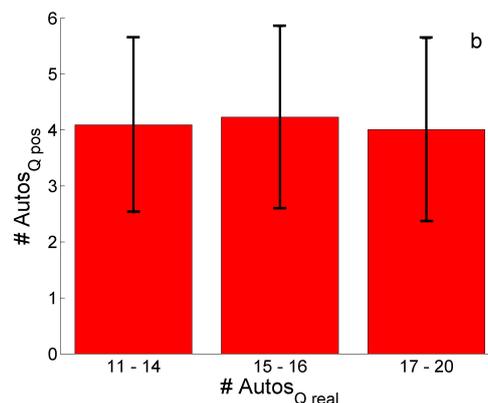


Abbildung 3.5: Anzahl Autos_{Q_pos} in Abhängigkeit der Anzahl Autos_{Q_real}.

3.1.4 Anzahl positionierter Autos in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung

Den Probanden wurden mit Kondition A und B zwei Aufgaben gestellt, die unter Umständen miteinander konkurrieren könnten. Um zu überprüfen, ob VPen die besonders gut in der Kollisionsvermeidung waren eventuell weniger Autos positioniert hatten und

umgedreht, wurden die entsprechenden Daten auf eine Korrelation hin geprüft. Wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist, besteht hier allerdings kein Zusammenhang ($r = 0.028$).

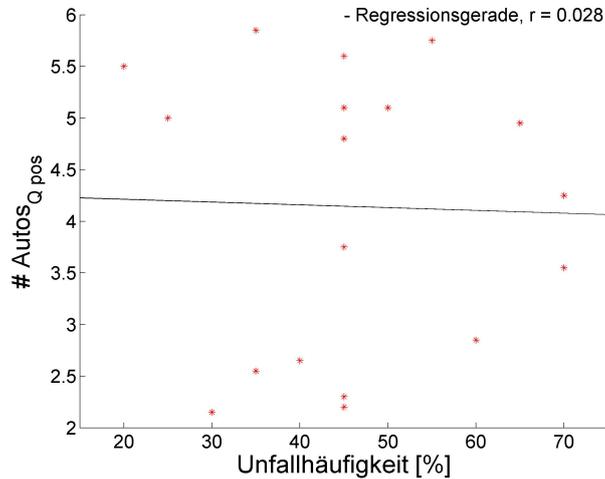


Abbildung 3.6: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Unfallvermeidungsleistung und der durchschnittlichen Anzahl gesetzter Autos? Jeder Datenpunkt steht für eine Versuchsperson.

3.1.5 Clusterbildung beim Positionieren

Wenn man die Setzreihenfolge der VPen in verschiedenen Durchgängen betrachtet, ist auffällig, dass die Autos_{Q_pos} nicht in einer willkürlichen Reihenfolge, sondern oft z.B. nach Fahrtrichtung getrennt oder in der Reihenfolge ihrer Position auf der Querstraße gesetzt wurden.

Um diese Beobachtung quantitativ untersuchen zu können, wurde der Begriff *Cluster* eingeführt. Dabei werden Autos_{Q_pos} zu je einem Cluster zusammengefasst, die sowohl zeitlich als auch räumlich als Sequenz und unmittelbar nacheinander gesetzt wurden.

Die Cluster-Bildung der Positionierungsdaten der VPen wurde verglichen mit der Cluster-Bildung auf simulierten Positionierungsdaten, in denen Setzreihenfolge und Position randomisiert waren. Für den Vergleich wurden die Durchgänge in Gruppen eingeteilt nach der Gesamtzahl der Autos_{Q_pos}.

Ab einer Gesamtanzahl von vier positionierten Autos ist die prozentuale Verteilung bei den VP-Daten im Vergleich zu den simulierten Daten deutlich in Richtung der größeren Clustern verschoben. Dies bestätigt die Beobachtung, dass die VPen Autos in Gruppen positionieren.

3.2 Auswertung der Positionierungsdaten Teil B

In Teil B werden alle Ergebnisse präsentiert, die sich auf den Vergleich der Autos_{Q_real} und der Autos_{Q_pos} beziehen. Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch die graphische Veranschauli-

chung der Rohdaten aus einem Durchgang.

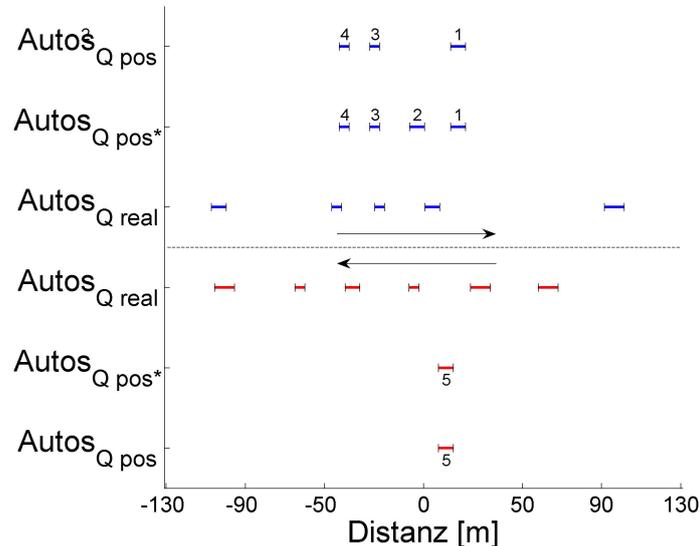


Abbildung 3.7: Beispiel für Rohdaten aus einem Positionierungsdurchgang. Die roten und blauen Balken repräsentieren die Autos des Querverkehrs, die Längen der Balken codieren entsprechend für die Autolängen. Die Daten sind nach Fahrtrichtung getrennt (blau = nach rechts; rot = nach links; durch die schwarzen Pfeile verdeutlicht) dargestellt. Die Zahlen geben die Reihenfolge an, in der die Autos positioniert wurden.

Um die Positionsdaten der VPen auszuwerten wurde zunächst eine Regel aufgestellt, die beschreibt, wie die gesetzten Autos auf die vorhandenen Autos abgebildet (zugeordnet) werden:

Für jeweils einen Durchgang sei P die Menge der final positionierten¹ Autos und V die Menge der zum Zeitpunkt (kurz vor) der Überblendung präsentierten Autos.

$d(p_i, v_k) :=$ Abstand zwischen dem i -ten positionierten und dem k -ten vorhandenen Auto in Metern, $1 \leq i \leq |P|$, $1 \leq k \leq |V|$.

Dann gibt es unter der Annahme, dass $m = |P| \leq |V| = n$ ², gerade $\binom{n}{m} m!$ viele Möglichkeiten der Zuordnung $Z(P, Q)$, so dass jedem $p_i \in P$ genau ein $v_k \in V$ und jedem $v_k \in V$ maximal ein $p_i \in P$ zugeordnet wird, das heißt jedes positionierte Auto wird genau einem vorhandenen Auto zugeordnet und jedes vorhandene Auto wird maximal einem positionierten Auto zugeordnet.

¹ Nach Abschluss der Korrekturphase.

² Dies kann im Folgenden angenommen werden, da nur in drei von 380 Durchgängen mehr Autos positioniert wurden, als tatsächlich vorhanden waren. Die drei betroffenen Durchgänge wurden nicht ausgewertet.

Für jede solche Zuordnung $Z(P,Q)$ kann dann der *Gesamtabstand* $D(P,V)$ berechnet werden mit

$$D(P,V) = \sum_{p_i \in P} d(p_i, v_{(p_i)}),$$

wobei $v_{(p_i)}$ gerade das $v \in V$ ist, das p_i zugeordnet wurde.

Wähle die Zuordnung $Z(P,V)_{min}$, für die der Gesamtabstand minimal ist, also

$$D_{min}(P,V) = \min(\sum_{p_i \in P, v_k \in V} d(p_i, v_k)),$$

mit $v_k \neq v_l$ für $p_i \neq p_j$, $1 \leq i, j \leq |P|$, $1 \leq k, l \leq |V|$.

Dabei ist zu beachten, dass nach dieser Regel zunächst alle gesetzten Autos einem vorhandenen Auto zugeordnet werden. Die Autolänge wird bisher nicht berücksichtigt und es gibt noch keine Obergrenze für den erlaubten Abstand zwischen zwei einander zugeordneten Autos. Abbildung 3.8 zeigt ein Beispiel für eine nach dieser Regel erstellte Zuordnung.

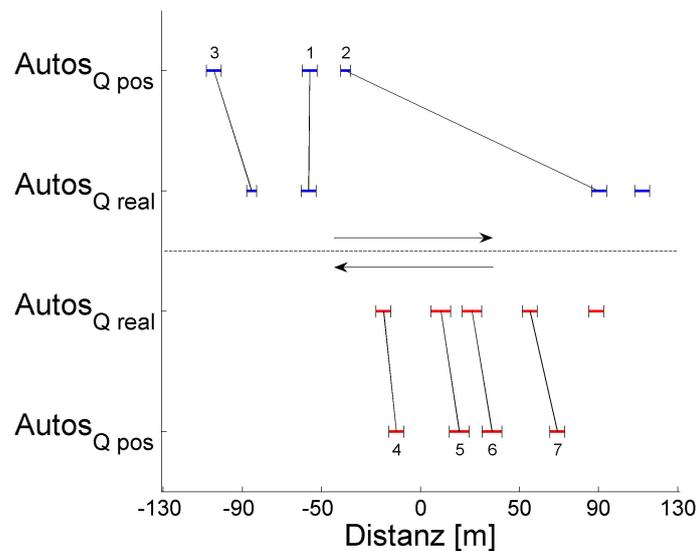


Abbildung 3.8: Beispiel für eine Zuordnung positionierter und vorhandener Autos unter Minimierung des Gesamtabstands. Die roten und blauen Balken repräsentieren die Autos des Querverkehrs, die Längen der Balken codieren entsprechend für die Autolängen. Die Daten sind nach Fahrtrichtung getrennt (blau = nach rechts; rot = nach links; durch die schwarzen Pfeile verdeutlicht) dargestellt. Die Zahlen geben die Reihenfolge an, in der die Autos positioniert wurden. Die schwarzen Verbindungslinien zwischen den Balken geben an welche Autopaare zugeordnet wurden. Am Beispiel des zweiten positionierten Autos sieht man eine Zuordnung, die so unter Umständen nicht sinnvoll ist.

Basierend auf dieser Zuordnung wurde der *Positionierungsfehler* definiert als Abstand zwischen einem von einer VP positionierten Auto und dem zugeordneten vorhandenen Auto

bezeichnet. Im Folgenden wird der Positionierungsfehler in Abhängigkeit verschiedener Parameter ausgewertet.

3.2.1 Übereinstimmung der Größe der positionierten Autos

Es wurden insgesamt 1547 Auto-Paare zugeordnet. Bei 1097 zugeordneten Auto-Paare stimmte die Fahrzeuggröße überein (ca. 71%). In 79 Fällen wurden zwei Autos zugeordnet, die sich um zwei Fahrzeuggrößen unterscheiden (ca. 5%).

3.2.2 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl positionierter Autos

Da die Anzahl der Autos_{Q_pos} über die VPen sehr unterschiedlich war (s. Abbildung 3.1) wurde untersucht, ob diese Anzahl einen Einfluss auf die Genauigkeit bei der Positionierung hatte. In Abbildung 3.9 (a) wurde dazu der Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl Autos_{Q_pos} als Boxplot-Diagramm dargestellt. Ein Kruskal-Wallis-Test zeigte einen signifikanten Einfluss der Anzahl der Autos_{Q_pos} auf den mittleren Positionierungsfehler ($p < 0,001$). Zur Veranschaulichung des Effekts wurden zusätzlich in Abbildung 3.9 (b) nur die Mediane über den jeweiligen Positionierungsfehler abgebildet und eine Regressionsgerade erstellt. Auch hier wurde eine Korrelation gefunden ($r = 0,91$), der Positionierungsfehler nimmt mit der Anzahl der Autos_{Q_pos} zu.

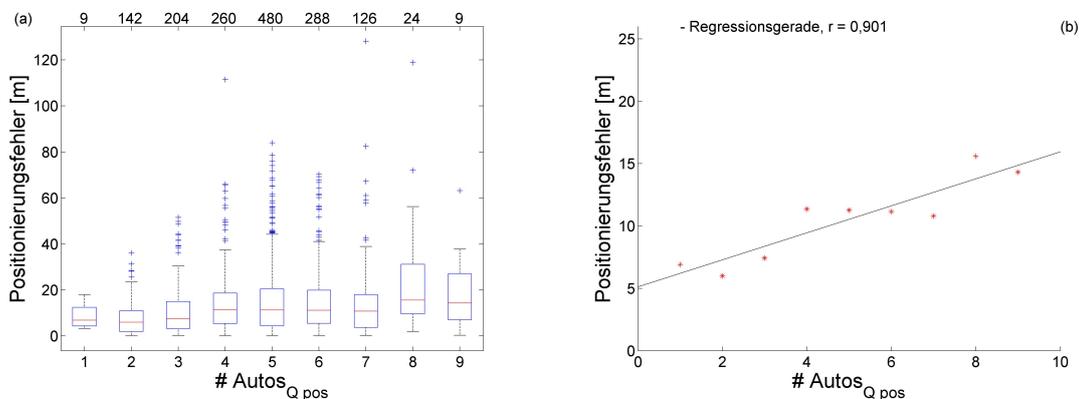


Abbildung 3.9: Darstellung des gemittelten Positionierungsfehlers der Autos_{Q_pos} in Abhängigkeit der Anzahl der Autos_{Q_pos}. (a) Boxplot-Darstellung der gesamten Daten. (Die Zahlen oberhalb des Diagramms entsprechen der jeweiligen Anzahl zugeordneter Paare.) (b) Median des Positionierungsfehlers in Abhängigkeit der Anzahl der Autos_{Q_pos} mit Regressionsgerade.

3.2.3 Positionierungsfehler in Abhängigkeit des Abstands zur Kreuzung

Wie bereits in Abbildung 3.3 gezeigt wurde, hatte die Aufgabenstellung einen Einfluss darauf, welche Autos_{Q_real} von den VPen memoriert wurden. Um zu überprüfen, ob dieser Effekt auch qualitativ zu messen ist, wurde der Positionierungsfehler für zugeordnete Auto-Paare in Abhängigkeit des Abstands der Autos_{Q_real} von der Kreuzung betrachtet.

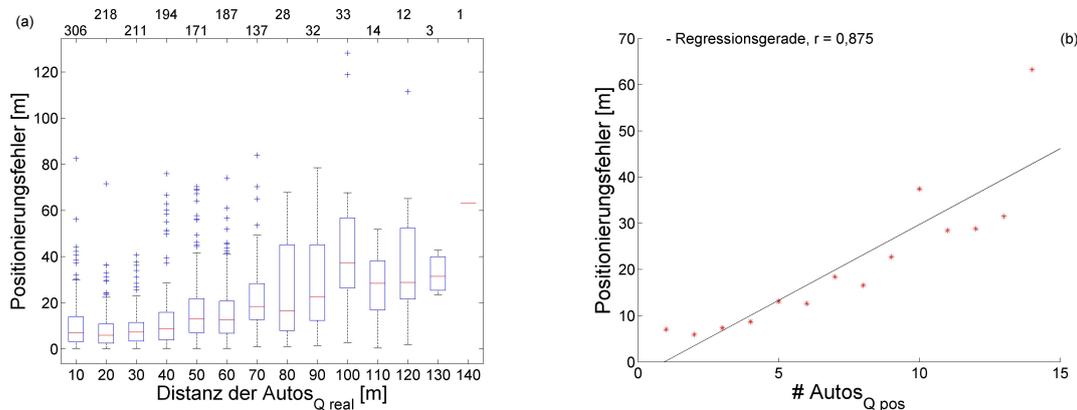


Abbildung 3.10: Darstellung des gemittelten Positionierungsfehlers der Autos_{Q pos} in Abhängigkeit des Abstands des zugeordneten Auto_{Q real} zur Kreuzung. (a) Boxplot-Darstellung der gesamten Daten. (Die Zahlen oberhalb des Diagramms entsprechen der jeweiligen Anzahl zugeordneter Paare.) (b) Median des Positionierungsfehlers in Abhängigkeit des Abstands des zugeordneten Auto_{Q real} zur Kreuzung mit Regressionsgerade.

Ein Kruskal-Wallis-Test auf den in Abbildung 3.10 (a) gezeigten Daten ergab auch hier einen signifikanten Zusammenhang. Wie in Abbildung 3.10 (b) zu sehen ist, konnte die Korrelation auch für die Mediane der Positionierungsfehler bestätigt werden ($r = 0,875$). Mit zunehmendem Abstand der Autos_{Q real} von der Kreuzung nahm der Positionierungsfehler zu.

3.2.4 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Setzreihenfolge

Die Korrelation der Setzreihenfolge mit dem Positionierungsfehler ergab keinen signifikanten Zusammenhang (zu Abbildung 3.11 (a): Kruskal-Wallis-Test: $p = 0,261$; zu Abbildung 3.11 (b): Korrelationsgerade: $r = 0,354$). Es ist allerdings ein Trend zu einem ansteigendem Positionierungsfehler vom ersten bis zum vierten Auto_{Q pos} zu beobachten, der jedoch ab dem fünften Auto_{Q pos} etwas rückläufig ist. Dabei ist zu beachten, dass die Stichprobenanzahl mit der Setzreihenfolge ab dem fünften Auto_{Q pos} stark abnimmt. Die Datenpunkte 8 und 9 in der Setzreihenfolge enthalten zusammen nur Daten von sechs der 1547 zugeordneten Auto-Paare. Daher wurde eine zweite Regressionsgerade unter Nicht-Berücksichtigung dieser beiden Datenpunkte erstellt ($r = 0,749$).

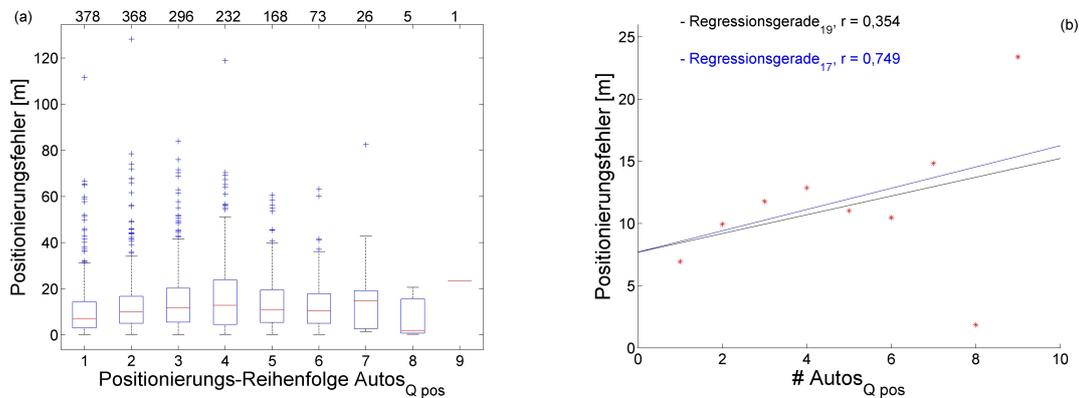


Abbildung 3.11: Darstellung des gemittelten Positionierungsfehlers der Autos_{Q pos} in Abhängigkeit der Setzreihenfolge. (a) Boxplot-Darstellung der gesamten Daten. (Die Zahlen oberhalb des Diagramms entsprechen der jeweiligen Anzahl zugeordneter Paare.) (b) Median des Positionierungsfehlers in Abhängigkeit der Setzreihenfolge. Regressionsgerade₁₉ wurde unter Verwendung der aller 9 Datenpunkte erstellt. Für Regressionsgerade₁₇ wurden nur die ersten sieben Datenpunkte berücksichtigt.

3.2.5 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung

In dieser Auswertung wurde überprüft, in wieweit die vorgegebenen Verkehrssituationen die Positionierungsleistungen der Probanden beeinflussten, bzw. ob es Präferenzen für eine Fahrtrichtung bzw. eine Autofarbe gab.

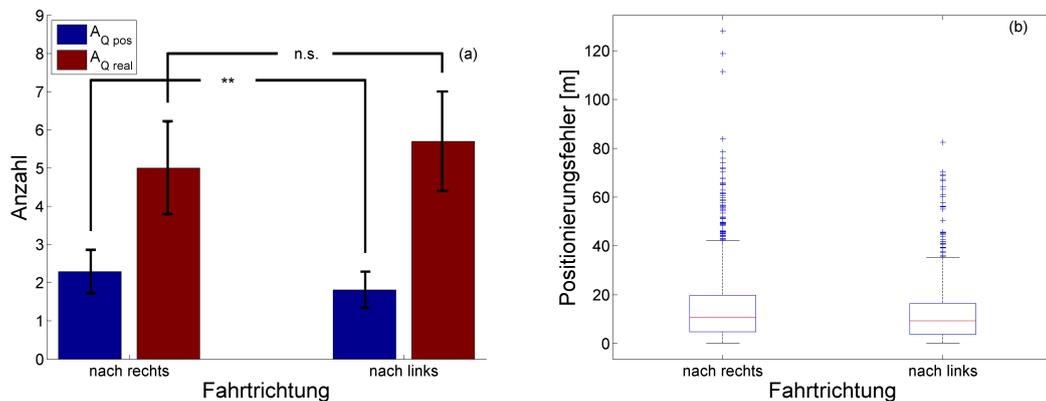


Abbildung 3.12: (a) # Autos_{Q pos} (blau) und # Autos_{Q real} in Abhängigkeit der Fahrtrichtung. (b) Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung.

Abbildung 3.12 (a) zeigt die Anzahl Autos_{Q pos} (blau) und Autos_{Q real} (braun) nach Fahrtrichtung. Es wurden signifikant mehr Autos_{Q pos} mit Fahrtrichtung nach rechts gesetzt (T-Test: $T(38) = 2,88$; $p < 0,01$). Die Anzahl der Autos_{Q real} unterschied sich zwischen den Fahrtrichtungen nicht signifikant (T-Test: $T(38) = -1,76$; $p = 0,087$), es waren jedoch im Schnitt mehr Autos_{Q real} mit Fahrtrichtung nach links.

Abbildung 3.12 (b) zeigt den gemittelten Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung. Dieser war für die Fahrtrichtung nach rechts (median 15,26) signifikant größer (Mann-Whitney-U-Test: $p < 0,001$) als für die Fahrtrichtung nach links (median 12,43).

3.2.6 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung

Analog zur Auswertung in Kapitel 3.1.4 wurden die Daten auch auf einen Zusammenhang zwischen der Unfallvermeidungsleistung und dem mittleren Positionierungsfehler hin überprüft (s. Abbildung 3.13). Auch hier konnte kein Zusammenhang gefunden werden ($r = 0,047$), d.h. VPen, die bei der Kollisionsvermeidung besser oder schlechter abschnitten machten nicht notwendigerweise auch größere oder kleinere Positionierungsfehler.

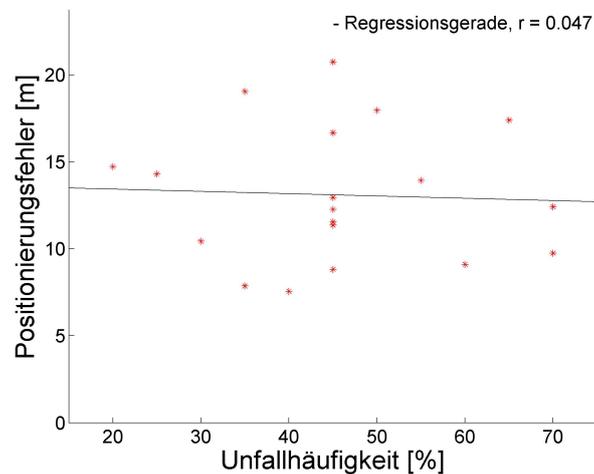


Abbildung 3.13: Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung. Jeder Datenpunkt entspricht einer Versuchsperson.

3.3 Fragebogen Auswertung

Der Fragebogen ist im Anhang auf Seite 49 zu finden.

Die VPen gaben an mittlere bis gute Erfahrung mit Computern ($\bar{x} = 5.95$, $sd = 1.75$) und etwas weniger Erfahrung mit Computerspielen ($\bar{x} = 3.53$, $sd = 2.04$) und einem Joystick ($\bar{x} = 2.58$, $sd = 1.68$) zu haben. Sie waren fast durchwegs gut motiviert den Versuch durchzuführen ($\bar{x} = 7.16$, $sd = 1.54$).

Kondition A ($\bar{x} = 7.79$, $sd = 0.71$) wurde deutlich schwerer empfunden als Kondition B ($\bar{x} = 4.47$, $sd = 1.93$). Nach Beendigung des Experiments sollten die VPen außerdem ihre eigene Leistung einschätzen: Für Kondition A gab es weder eine Korrelation zwischen der Einschätzung und der Setzmenge ($r = 0,15$), noch zwischen der Einschätzung und dem gemittelten Positionierungsfehler ($r = 0,21$). Im Fall von Kondition B schienen die

VPen ihre Leistung dagegen recht gut beurteilen zu können ($r = 0,69$), obwohl während der Versuchsdurchführung kein Feedback (Kollision ja/nein) gegeben wurde.

KAPITEL 4

Diskussion

4.1 Auswertung der Positionierungsdaten Teil A

4.1.1 Anzahl positionierter Autos

Die über die VPen gemittelte Anzahl von ~ 4 Autos_{Q_pos} pro Durchgang entspricht den bisherigen Ergebnissen über die quantitative Limitierung des VSTMs [Alv04, Bad03, Luc97]. Die Variation innerhalb der VP-Gruppe zwischen 2 und 5,5 Autos_{Q_pos} könnte teilweise durch die Art der Instruktion entstanden sein. Um ein Raten der VPen in Kondition A zu vermeiden wurden sie instruiert, nur Autos zu positionieren, bei denen sie sich über Größe und Position relativ sicher waren (s. auch Kapitel 4.4). Dies ist natürlich unterschiedlich interpretierbar sein und könnte erklären, warum manche VPen nur 2 - 2,5 Autos pro Durchgang positionierten. Interessant war auf der anderen Seite auch die Abweichung nach oben. In einigen Durchgängen wurden bis zu neun Autos positioniert. Eine mögliche Erklärung für diese Überschreitung der ansonsten postulierten VSTM-Begrenzung wäre die Gruppierung von Autos im VSTM, also dass teilweise mehrere Autos_{Q_real} als ein VSTM-Objekt memoriert wurden (s. hierzu auch Kapitel 3.1.5 und 4.1.5 sowie [Awh07]).

Erstaunlich war, dass im Vergleich der Überblendungsdauern in Studie B, bzw. auch der Vergleich mit Studie A, weder ein Einfluss der Überblendungsdauer auf die Setzmenge noch auf den Positionierungsfehler erkennbar war. Die VPen setzten nach einer Verzögerung von bis zu 30 Sekunden weder weniger Autos, noch machten sie einen größeren Positionierungsfehler pro Auto_{Q_pos} (Daten nicht gezeigt).

4.1.2 Verteilung der positionierten Autos

Die Verteilung der Autos_{Q_pos} auf der Querstraße zeigt, dass von den VPen hauptsächlich Autos_{Q_real} im kreuzungsnahen Bereich memoriert wurden. Die maximale Anzahl von Autos_{Q_pos} liegt für beide Fahrtrichtungen zwischen 5 und 35 Meter vor der Kreuzung. Interessant ist dabei, dass selbst bei maximaler Geschwindigkeit der VP kein Autos_{Q_real} potentiell kollisionsgefährlich war, das weniger als 25m von der Kreuzung entfernt war.

Es wurden also nicht ausschließlich solche Autos_{Q real} memoriert, die für die Aufgabe der Kollisionsvermeidung relevant waren, sondern auch solche, die zum Kreuzungsmittelpunkt hin verschoben waren bzw. die sich im Mittelpunkt der Leinwand befanden. Eine mögliche Erklärung für die Memorierung der nicht kollisionsgefährlichen Autos_{Q real} wäre, dass die Kreuzung im zentralen Blickfeldbereich der VPen lag und allein dadurch häufiger betrachtet wurden. Hier könnte zukünftig die Auswertung der Blickbewegungsdaten Aufschluss geben, die leider im Rahmen der Diplomarbeit nicht mehr möglich war.

4.1.3 Anzahl positionierter Autos in Relation zur Gesamtanzahl vorhandener Autos

Da die Anzahl der Autos_{Q pos} unabhängig von der Anzahl der Autos_{Q real} war, wird davon ausgegangen, dass die VSTM-Auslastung in allen Durchgängen (also bereits in den Durchgängen mit der geringsten Anzahl von Autos_{Q real}) maximal war.

4.1.4 Anzahl positionierter Autos in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung

Wäre hier ein Zusammenhang gefunden worden, so hätte man dies als ein Indiz dafür auffassen können, dass die beiden Konditionen A und B um die Aufmerksamkeit der VPen konkurrierten bzw. dass manche VPen ihre Konzentration auf das Memorieren möglichst vieler Autos_{Q real} verlagert und dabei weniger auf die unfallrelevanten Autos_{Q real} geachtet hätten. Dies hätte bei VPen mit hoher Anzahl von Autos_{Q pos} eine höhere Unfallrate zur Folge gehabt. Der Umkehrschluss (kein Zusammenhang → keine Konkurrenz zwischen Konditionen A und B) ist allerdings nicht möglich.

4.1.5 Clusterbildung beim Positionieren

Das Ergebnis allein, dass Autos als Cluster positioniert wurden, gibt noch keinen unmittelbaren Rückschluss darauf, dass mehrere Autos als verschmolzenes Objekt im VSTM gespeichert wurden. Die Tatsache, dass Autos_{Q pos} häufig als Sequenz positioniert wurden, kann auch darin begründet sein, dass diese Autos eine räumliche Konformation einnahmen (sowohl auf der Querstraße als auch im Arbeitsgedächtnis) und es das Positionieren erschwert oder verlangsamt hätte, bei der Positionierungsreihenfolge von dieser räumlichen Konfiguration abzuweichen (beispielsweise schreibt man eine Telefonnummer auch immer als Sequenz von vorne nach hinten; trotzdem muss jede einzelne Ziffer gemerkt werden). Was jedoch dafür spricht, dass eine Art Clusterung auch im VSTM stattfand, ist die Tatsache, dass in manchen Durchgängen bis zu neun Autos positioniert wurden. Hier könnte ein Kontrollexperiment Aufschluss liefern, das so angelegt wäre.

4.2 Auswertung der Positionierungsdaten Teil B

Die in Kapitel 3.2 beschriebene Zuordnungsregel ist noch ausbaubar und verbesserbar. Denkbar wäre eine Obergrenze für den maximal erlaubten Abstand zwischen zwei zugeordneten Autos sowie eine „Strafe“ für nicht übereinstimmende Autogrößen. Eine weitere

Möglichkeit bestände darin, nicht nur einzelne Autos, sondern n -Tupel räumlich zusammenhängender $\text{Autos}_{Q_{\text{pos}}}$ mit entsprechenden n -Tupeln von $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$ zu vergleichen. Als zusätzlicher Parameter käme hierbei der Abstand innerhalb der Tupel hinzu.

4.2.1 Übereinstimmung der Größe der positionierten Autos

Die unterschiedlichen Fahrzeuggrößen wurden von den Probanden erkannt und auch memoriert.

4.2.2 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl positionierter Autos

Für die Zunahme des Positionierungsfehler mit der Anzahl der $\text{Autos}_{Q_{\text{pos}}}$ gibt es mehrere Erklärungsansätze. Xu et al konnte in der eingangs beschriebenen Studie (s. Kapitel 1.2) zeigen, dass die VSTM-Kapazität bis auf die Hälfte einbrechen kann, wenn es um Detailbetrachtungen an einem Objekt geht. In Umkehrung könnte dies für das hier betrachtete Paradigma bedeuten, dass die quantitative Kapazität für $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$ mit abnehmender Genauigkeit der Repräsentation eines einzelnen Autos zunimmt. Dies würde bedeuten, dass eine größere Anzahl auf Kosten geringerer Genauigkeit gespeichert werden könnte.

Ein andere Erklärung wäre eine bewusste Beeinflussung durch die Probanden. Dies könnte durch bewusste Aufmerksamkeitssteuerung auf Kondition A geschehen sein (aktives Memorieren einer möglichst großen Anzahl von $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$) oder durch „Fehlinterpretation“ der Instruktion (im Sinne des Versuchsleiters) mit der Folge, dass auch solche Autos positioniert wurden, bei denen die Information über Position (und möglicherweise auch Größe und Farbe) nur noch vage war.

4.2.3 Positionierungsfehler in Abhängigkeit des Abstandes zur Kreuzung

Neben den Ergebnissen aus Kapitel 3.1.2 deutet dieses Ergebnis daraufhin, dass nicht nur der Anteil der Repräsentation im VSTM für den kreuzungsnahen Bereich höher ist, sondern dass die Repräsentation für diesen Bereich auch genauer ist, als für den peripheren Bereich der Querstraße. Dies ist ein zusätzliches Indiz dafür, dass die Befüllung des VSTM aufgabenabhängig geschah. Den peripheren Bereich der Querstraße zu beobachten ist aber aufgrund der Größe der Leinwand auch mit höheren Kosten in Form von Kopfbewegungen verbunden [Har08]. Ein Folgeexperiment an einem Monitor, dessen Fläche durch Augenbewegungen abdeckbar ist, wäre denkbar.

Dass Bereich, in dem der Positionierungsfehler minimal war, jedoch nicht mit dem Bereich der bei gleichbleibender Geschwindigkeit unfallrelevanten $\text{Autos}_{Q_{\text{real}}}$, also zwischen 45m und 72m, zusammenfiel, deutet auf einen noch nicht entdeckten Mechanismus hin, der die Aufmerksamkeit unabhängig von der Kollisionsvermeidungsaufgabe in Richtung des unmittelbaren Kreuzungsbereichs verschiebt.

4.2.4 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Setzreihenfolge

Auch wenn die Ergebnisse nicht signifikant sind ist hier doch ein Trend in der zu erwartenden Richtung zu erkennen. Ein möglicherweise doch vorhandene positive Korrelation zwischen der Setzreihenfolge und der Güte der Repräsentation im VSTM könnte in der Positionierungs-Kondition unter Umständen überlagert worden sein, da die Setzreihenfolge vermutlich auch praktischen Einflüssen unterliegt (z.B. Setzreihenfolge = Reihenfolge der memorierten Autos_{Q real} entlang der Straße, vgl. Kapitel 4.1.5).

4.2.5 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung

Sowohl Anzahl der Autos_{Q pos} als auch der Positionierungsfehler unterschieden sich signifikant in Abhängigkeit der Fahrtrichtung. Hier fehlen allerdings entsprechende Kontrollen, um die genaue Ursache auszumachen. In zukünftigen Experimenten sollte daher für die Autofarbe und die Fahrtrichtung (durch Spiegelung der Verkehrssituation) kontrolliert werden.

4.2.6 Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung

Hier gilt prinzipiell die gleiche Argumentation wie in Kapitel 4.1.4.

4.3 Fragebogen Auswertung

Einige der Fragen bezüglich Kondition B könnten durchaus interessant für die Beurteilung des Paradigmas sein. Die Positionierungsaufgabe wurde von den VPen nicht nur durchwegs als sehr schwer empfunden, sie waren auch relativ schlecht, als es darum ging die eigene Leistung sowohl bezüglich der Setzmenge als auch der Genauigkeit der positionierten Autos einzuschätzen. Dagegen gelang ihnen diese Leistungseinschätzung für die Unfallvermeidung relativ gut. Ohne zu viel in diese Ergebnisse hineininterpretieren zu wollen, könnte dies ein Anzeichen dafür sein, dass die gewählte Abfrageart des VSTM-Inhalts durch den hohen Schwierigkeitsgrad nicht optimal war. Alternativen sind in Planung (s. Kapitel 5).

4.4 Zur Eignung des Paradigmas - Die aufgabenbezogene Untersuchung des VSTMs

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit das eingesetzte Paradigma geeignet war, den aufgabenabhängigen Inhalt des VSTMs abzufragen. Dass grundsätzlich eine VSTM-Nutzung in der gestellten Kollisionsvermeidungsaufgabe vorlag, und diese auch innerhalb gewisser Grenzen gemessen werden konnte geht aus der bisherigen Diskussion hervor. Im Folgenden will ich mich jedoch auch kritisch mit einigen Punkten auseinandersetzen, an denen noch Verbesserungspotential besteht.

Prinzipiell könnte sich eine gewisse Problematik aus der Möglichkeit (für die VPen) ergeben haben, Kondition A als konkurrierende Aufgabe zu Kondition B zu verstehen. Dies könnte zum Beispiel ganz menschliche Gründe gehabt haben, wie dass eine VP Kondition A spannender fand, oder ehrgeizig war diese Aufgabe besonders gut zu lösen.

Der Verdacht, dass die beiden Aufgaben konkurrierten ist nicht unbegründet. In einem Vorversuch waren die beiden Strecken \overline{SB} und \overline{BE} (s. Abbildung 2.1) bis zu dreimal länger gewesen. Die Probanden aus diesem Vorversuch hatten anschließend berichtet, die passive Phase nicht hinsichtlich der Unfallvermeidung zu nutzen, sondern sich aktiv die Autos_{Q real} einzuprägen (und zwar mehr in der Form einer Sequenz von Autogrößen, als sich auf einzelne Autos mit genauer Position zu konzentrieren). Die Anfahrtstrecke wurde daraufhin verkürzt, um durch höheren Zeitdruck (kürzere Strecke → weniger Zeit bis zum Erreichen der Kreuzung) diese zweigeteilte Strategie zu verhindern. An dieser Stelle wäre entsprechendes Vergleichsexperiment denkbar, in dem die Probanden gerade dazu angehalten werden, sich einen möglichst großen Teil der Verkehrsszene einzuprägen. Mögliche zu erwartende Ergebnisse wären a) eine geringfügige Steigerung der Anzahl der Objekte (Autos), die memoriert werden, da der Leistungsdruck durch die Unfallvermeidung nicht so hoch ist und noch wahrscheinlicher b) eine andere Verteilung der memorierten Autos auf der Querstraße.

Für die Instruktion der VPen war es besonders wichtig, die Unfallvermeidung eindeutig als eigentliche bzw. Hauptaufgabe zu deklarieren. Da jedoch auch die Positionierungsaufgabe erklärt und geübt werden musste war dies nicht immer ganz einfach, vor allem aber ist es schwer nachzuvollziehen, wie eine VP die Instruktion individuell auffasst bzw. gewichtet. Eine ideale Abfrage des VSTM-Inhalts würde theoretisch spontan und ohne vorhergehende Ankündigung geschehen. Dies wäre allerdings immer nur einmal pro VP möglich, da sie ab dem Zeitpunkt der ersten solchen VSTM-Abfrage vermutlich mit weiteren Abfragen rechnen würde. Zu beachten ist für eine solche spontane Abfrage außerdem die kurze Speicherdauer im VSTM bzw. die kontinuierliche Überschreibung des VSTM-Inhalts. Würde die VSTM-Abfrage (z.B. in gleicher Form wie in Kondition A) erfolgen, aber ohne jemals geübt worden zu sein, so würde unter Umständen relativ viel Zeit vergehen, bis die VP die neue Aufgabe verstehen würde. In dieser Zeit könnte der Inhalt des VSTM verblassen oder überschrieben werden. Ein Training der Abfrage-Kondition war daher notwendig.

Um diese Problematik - soweit im Rahmen der Instruktion möglich - einzuschränken, wurden die VPen mehrfach darauf hingewiesen, sich in der passiven Anfahrtsphase optimal auf die Unfallvermeidungsaufgabe vorzubereiten, d.h. die Autos_{Q real} dementsprechend zu beobachten. Für die Positionierungsaufgabe wurden sie angewiesen, diejenigen Autos_{Q real}, an die sie sich erinnern konnten, 1. möglichst genau zu positionieren und 2. nicht zu raten und Autos_{Q real}, bei deren Position sie sich unsicher waren, gar nicht zu positionieren. Es wurde außerdem darauf hingewiesen, dass die Aufgabe nicht darin besteht, die gesamte Verkehrssituation zu rekonstruieren. Während es das Ziel dieser Hinweise war, die Aufmerksamkeit der VPen auf Kondition B als Hauptaufgabe zu lenken, könnten sie von einigen VPen überinterpretiert worden sein, was eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass

einige VPen nur 2-2,5 Autos pro Durchgang positionierten (s. Kapitel 3.1.1).

Die Ergebnisse aus den Kapiteln 3.1.4 und 3.2.6 entschärfen die Problematik wiederum, da keine Korrelation zwischen der Unfallvermeidungsleistung und der Positionierungsleistung gefunden wurde. Außerdem konnten in der aktuellen Studie schon einige wichtige Ergebnisse gewonnen werden. Durch Überarbeitung einiger Aspekte kann und soll das Paradigma zukünftig noch verbessert werden.

KAPITEL 5

Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgelegte Diplomarbeit mit dem Titel *Die Rolle des Arbeitsgedächtnisses in einem virtuellen dynamischen Kollisionsvermeidungsexperiment* zielte auf die Untersuchung des visuellen Arbeitsgedächtnisses (VSTM) während der Durchführung einer Aufgabe in virtueller Realität. Dazu wurde ein Paradigma verwendet, in dem Versuchspersonen (VPen) die Aufgabe hatten, in einem virtuellen Kreuzungsszenario Kollisionen zu vermeiden. Die Eingangshypothese sah zunächst drei unterschiedlich vollständige Möglichkeiten für die Repräsentation der Verkehrsszene im VSTM vor. Es konnte gezeigt werden, dass nicht die gesamte Verkehrsszene, wohl aber ein gewisser Anteil von etwa zwei bis sechs Fahrzeugen im VSTM gespeichert werden konnte.

Die Wiedergabe des VSTM-Inhalts erfolgte durch Rekonstruktion der Verkehrssituationen. Die VPen konnten dazu mit Hilfe eines Joysticks Autos auswählen und positionieren. Die von den VPen positionierten Autos konnten dann hinsichtlich verschiedener Parameter mit der jeweils präsentierten Verkehrssituation verglichen werden. Dazu wurde eine Zuordnungsregel erstellt, nach der in Abhängigkeit des Abstands zwischen je einem präsentierten und einem positionierten Fahrzeug für jeden Versuchsdurchgang die Menge der positionierten Autos eindeutig auf die Menge der vorhandenen Autos abgebildet wurde. Basierend auf dieser Zuordnung wurde der Positionierungsfehler für jedes positionierte Auto (Abstand zum zugeordneten präsentierten Auto) berechnet.

Es konnte gezeigt werden, dass hauptsächlich solche Autos memoriert wurden, die sich im Bereich zwischen 50m und 0m vor der Kreuzung (in Fahrtrichtung) befanden. Dies umfasste unmittelbar kollisionsgefährliche Fahrzeuge, aber auch solche im zentralen Blickbereich der VPen, mit denen keine Kollision mehr möglich gewesen wäre. Der Positionierungsfehler pro gesetztem Auto stieg mit der Anzahl pro Durchgang gesetzter Autos, sowie mit dem Abstand vom Kreuzungsmittelpunkt. Außerdem konnte ein Trend gezeigt werden, der vermuten lässt, dass die Autos in der Reihenfolge gesetzt wurden, die der Präsentationsgüte der einzelnen Autos entspricht (gut repräsentierte Autos zuerst). Nicht ganz eindeutig waren die Ergebnisse hinsichtlich der Fragen, ob mehrere Autos gemeinsam als ein Objekt im VSTM gespeichert wurden, wenn sie sich räumlich nahe waren.

Im Rahmen eines anschließenden Promotionsprojektes ist die Fortführung und Überarbeitung des Paradigmas geplant. Zunächst soll die Abfrage ersetzt werden und analog zu klassischen Paradigmen der Effekt der Veränderungsblindheit genutzt werden. Anstatt der Positionierungsaufgabe soll dann z.B. ein Bild der zuletzt gesehenen Kreuzungssituation mit einer kontrollierten Veränderung (hier sind vielfältige Variationen denkbar, z.B. Versatz, Deletion, Austausch oder Einfügung eines Autos in unterschiedlich kollisionsrelevanten Bereichen der Querstraße) gezeigt werden. Der Vorteil gegenüber der Positionierung wäre die eindeutigere Auswertbarkeit der Daten, sowie der geringere Schwierigkeitsgrad für die VPen.

Weiterhin ist es meiner Meinung nach nötig, Kontrollexperimente hinsichtlich verschiedene Parameter einzuführen. Beispiele für zu kontrollierende Parameter wären Fahrtrichtung (Verkehrssituationen spiegeln), Größe und Farbe der Fahrzeuge. Außerdem würde ich gern ein Kontrollexperiment an einem Bildschirm normaler Größe durchführen, um Effekte der großflächigen Leinwand erkennen bzw. ausschließen zu können. Für dieses und folgende Paradigmen zur aufgabenabhängigen Untersuchung des VSTMs wäre es weiterhin sinnvoll, Kontrollexperimente ohne die jeweilige Aufgabenstellung für die VPen durchzuführen. So könnten Vergleiche der selektiven VSTM-Befüllung mit und ohne Aufgabe angestellt werden. Diese Liste der zu kontrollierenden Parameter ist vermutlich noch nicht vollständig.

Nicht zuletzt verbleibt die Auswertung der Blickbewegungsdaten, die im Rahmen der Diplomarbeit leider nicht mehr durchgeführt werden konnte. Die Daten liegen jedoch vor und entsprechende Analysen werden folgen. Hier soll zum Beispiel die Frage untersucht werden, ob es eine Korrelation zwischen der Fixationshäufigkeit und -dauer auf bestimmte Fahrzeuge und den im VSTM gespeicherten Autos gibt. Denkbar ist auch eine Analyse der Blickspuren der einzelnen VPen in Abhängigkeit der Verkehrssituation, um Blickbewegungsstrategien zu untersuchen und möglicherweise optimale Blickspuren zur Lösung einer bestimmten Aufgabe zu simulieren.

Literaturverzeichnis

- [All06] ALLEN, Roy; MCGEORGE, Peter; PEARSON, David G und MILNE, Alan: Multiple-target tracking: A role for working memory? *Q J Exp Psychol (Colchester)* (2006), Bd. 59(6):S. 1101–1116, URL <http://dx.doi.org/10.1080/02724980543000097> (Zitiert auf Seite 8)
- [Alv04] ALVAREZ, G. A. und CAVANAGH, P.: The capacity of visual short-term memory is set both by visual information load and by number of objects. *Psychol Sci* (2004), Bd. 15(2):S. 106–111 (Zitiert auf Seiten 5 und 36)
- [Alv07] ALVAREZ, George A und FRANCONERI, Steven L: How many objects can you track? Evidence for a resource-limited attentive tracking mechanism. *J Vis* (2007), Bd. 7(13):S. 14.1–1410, URL <http://dx.doi.org/10.1167/7.13.14> (Zitiert auf Seite 8)
- [Awh07] AWH, Edward; BARTON, Brian und VOGEL, Edward K: Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychol Sci* (2007), Bd. 18(7):S. 622–628, URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01949.x> (Zitiert auf Seite 36)
- [Bad66a] BADDELEY, A. D.: The influence of acoustic and semantic similarity on long-term memory for word sequences. *Q J Exp Psychol* (1966), Bd. 18(4):S. 302–309 (Zitiert auf Seite 4)
- [Bad66b] BADDELEY, A. D.: Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic and formal similarity. *Q J Exp Psychol* (1966), Bd. 18(4):S. 362–365 (Zitiert auf Seite 4)
- [Bad00] BADDELEY: The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends Cogn Sci* (2000), Bd. 4(11):S. 417–423 (Zitiert auf Seiten 3 und 4)
- [Bad01] BADDELEY, A. D.: Is working memory still working? *Am Psychol* (2001), Bd. 56(11):S. 851–864 (Zitiert auf Seite 3)
- [Bad03] BADDELEY, Alan: Working memory: looking back and looking forward. *Nat Rev Neurosci* (2003), Bd. 4(10):S. 829–839, URL <http://dx.doi.org/10.1038/nrn1201> (Zitiert auf Seiten 3, 4, 5, 6, 7 und 36)

- [Bad07] BADDELEY: The phonological loop: Some answers and some questions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* (2007), Bd. 60:S. 512–518 (Zitiert auf Seite 3)
- [Bar96] BARGH, J. A.; CHEN, M. und BURROWS, L.: Automaticity of social behavior: direct effects of trait construct and stereotype-activation on action. *J Pers Soc Psychol* (1996), Bd. 71(2):S. 230–244 (Zitiert auf Seite 5)
- [Bar00] BARGH, J. A. und FERGUSON, M. J.: Beyond behaviorism: on the automaticity of higher mental processes. *Psychol Bull* (2000), Bd. 126(6):S. 925–945 (Zitiert auf Seite 5)
- [Bau98] BAUMEISTER, R. F.; BRATSLAVSKY, E.; MURAVEN, M. und TICE, D. M.: Ego depletion: is the active self a limited resource? *J Pers Soc Psychol* (1998), Bd. 74(5):S. 1252–1265 (Zitiert auf Seite 5)
- [Cha99] CHARTRAND, T. L. und BARGH, J. A.: The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction. *J Pers Soc Psychol* (1999), Bd. 76(6):S. 893–910 (Zitiert auf Seite 5)
- [Con64] CONRAD, R. und HULL, A. J.: Information, Acoustic Confusion And Memory Span. *Br J Psychol* (1964), Bd. 55:S. 429–432 (Zitiert auf Seite 4)
- [Har08] HARDIESS, Gregor; GILLNER, Sabine und MALLOT, Hanspeter A: Head and eye movements and the role of memory limitations in a visual search paradigm. *J Vis* (2008), Bd. 8(1):S. 7.1–713, URL <http://dx.doi.org/10.1167/8.1.7> (Zitiert auf Seite 38)
- [Luc97] LUCK, S. J. und VOGEL, E. K.: The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature* (1997), Bd. 390(6657):S. 279–281, URL <http://dx.doi.org/10.1038/36846> (Zitiert auf Seiten 5 und 36)
- [Mur00] MURAVEN, M. und BAUMEISTER, R. F.: Self-regulation and depletion of limited resources: does self-control resemble a muscle? *Psychol Bull* (2000), Bd. 126(2):S. 247–259 (Zitiert auf Seite 5)
- [O'R92] O'REGAN, J. K.: Solving the "real" mysteries of visual perception: the world as an outside memory. *Can J Psychol* (1992), Bd. 46(3):S. 461–488 (Zitiert auf Seite 6)
- [Pap] PAPAGEORGIOU, E.; HARDIESS, G.; VONTHEIN, R.; ACKERMANN, H.; KARNATH, H.-O.; WIETHOELTER, H.; SCHOENFISCH, B.; MALLOT, HA und SCHIEFER, U.: Driving performance in patients with homonymous visual field defects and healthy subjects in a standardized virtual reality environment. *submitted* (Zitiert auf Seiten 9 und 18)
- [Ren97] RENSINK, Ronald An; O'REAGON, Kevin J. und J., Clark James: To see or not to see. *Psychological Science* (1997), Bd. 8:S. 368–373 (Zitiert auf Seiten 5 und 6)

- [Ren02] RENSINK, Ronald A: Change detection. *Annu Rev Psychol* (2002), Bd. 53:S. 245–277, URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135125> (Zitiert auf Seite 5)
- [Sch05] SCHMIDT; LANG und THEWS: *Physiologie des Menschen*, Springer, 29. Aufl. (2005) (Zitiert auf Seite 6)
- [Sha91] SHALLICE, T. und BURGESS, P. W.: Deficits in strategy application following frontal lobe damage in man. *Brain* (1991), Bd. 114 (Pt 2):S. 727–741 (Zitiert auf Seite 4)
- [Sim97] SIMONS, D. J. und LEVIN, Daniel T.: Change blindness. *Trends Cogn Sci* (1997), Bd. 1(7):S. 261–267 (Zitiert auf Seite 6)
- [Sim00] SIMONS, D. J.; FRANCONERI, S. L. und REIMER, R. L.: Change blindness in the absence of a visual disruption. *Perception* (2000), Bd. 29:S. 1143–1154 (Zitiert auf Seite 6)
- [SV05] SANCHEZ-VIVES, Maria V. und SLATER, Mel: From presence to consciousness through virtual reality. *Nat Rev Neurosci* (2005), Bd. 6:S. 332–339 (Zitiert auf Seite 17)
- [Xu06] XU, Yaoda und CHUN, Marvin M: Dissociable neural mechanisms supporting visual short-term memory for objects. *Nature* (2006), Bd. 440(7080):S. 91–95, URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature04262> (Zitiert auf Seite 7)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiele für mehrdeutige Bilder	1
1.2	Baddeleys Arbeitsgedächtnismodell - schematisch	3
1.3	Schematische Darstellung One-Shot-Paradigm und Flicker Paradigm	5
1.4	Beispiele für statische Pardigmen zur Untersuchung der quantitativen Arbeitsgedächtnislimitierung 1.	7
1.5	Beispiele für statische Pardigmen zur Untersuchung der quantitativen Arbeitsgedächtnislimitierung 2.	7
1.6	Beispiel für ein dynamisches Pardigma zur Untersuchung der quantitativen Arbeitsgedächtnislimitierung.	8
2.1	Überblick über die virtuelle Versuchsumgebung aus der Vogelperspektive.	11
2.2	Übersicht über die möglichen Autogrößen und -farben.	12
2.3	Das Paradigma - die passive Anfahrt.	14
2.4	Das Paradigma - Kondition A - Teil 1	15
2.5	Das Paradigma - Kondition A - Teil 2	16
2.6	Schematische Übersicht über das Leinwand-Setup zur Darstellung des Paradigmas.	18
2.7	Photo der Leinwand mit Versuchsperson.	19
2.8	Eyetracker 'Model 501', ASL	20
3.1	Vergleich der gemittelten Anzahl gesetzter Autos pro Durchgang zwischen den Versuchspersonen.	24
3.2	Anzahl gesetzter Autos pro Durchgang in Abhängigkeit der Überblendungsdauer.	25
3.3	Verteilung der positionierten Autos auf der Querstraße.	26
3.4	Prozentuale Verteilung der gesetzten Autos (in Fahrtrichtung) vor und nach der Kreuzung.	27
3.5	Anzahl Autos _{Q pos} in Abhängigkeit der Anzahl Autos _{Q real}	27
3.6	Gegenüberstellung Unfallvermeidungsleistung - Setzverhalten quantitativ.	28
3.7	Beispiel für Rohdaten aus einem Positionierungsdurchgang.	29
3.8	Beispiel für eine Zuordnung positionierter und vorhandener Autos unter Minimierung des Gesamtabstands.	30

3.9	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Anzahl positionierter Autos. . .	31
3.10	Positionierungsfehler in Abhängigkeit des Abstands von der Kreuzung. . .	32
3.11	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Positionierungsreihenfolge. . . .	33
3.12	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Fahrtrichtung	33
3.13	Positionierungsfehler in Abhängigkeit der Unfallvermeidungsleistung. . . .	34

Appendix A - Instruktion

Liebe(r) Proband(in),

Fassung 09.11.07

Das heutige Experiment besteht aus einem graphischen Programm (ähnlich einem Computerspiel), welches auf die große gekrümmte Leinwand vor Ihnen projiziert wird. Diese Leinwand nimmt während des Versuchs einen sehr großen Teil des Blickfelds ein. (Sollte Ihnen während des Verlaufs übel werden können Sie das Experiment jederzeit abbrechen!)

Zur Aufzeichnung Ihrer Kopf- und Augenbegegnungen wird Ihnen der Versuchsleiter einen Helm mit einer entsprechenden Messapparatur aufsetzen.

Zur eigentlichen Aufgabe:

Sie werden sich am Steuer eines Autos wiederfinden, das auf eine Kreuzung mit Querverkehr zu fährt. Zunächst haben Sie keine Möglichkeit, die eigene Geschwindigkeit zu beeinflussen. Beobachten Sie bitte jetzt schon den Querverkehr, um sich optimal auf die folgende Aufgabe vorzubereiten. Die Zeit, die Ihnen zur Ausführung eines einzelnen Durchgangs (1 Anfahrt auf die Kreuzung) zur Verfügung steht, ist nur sehr kurz. Nach einigen Sekunden wird für sehr kurze Zeit ein schwarzer Balken eingeblendet, der die Autos des Querverkehrs vollständig verdeckt. Nach dem Verschwinden des schwarzen Balkens wird jeweils eine von zwei verschiedene Aufgaben präsentiert:

A) Unfallvermeidung: Mit dem Joystick vor Ihnen können Sie ab jetzt die Geschwindigkeit Ihres eigenen Autos steuern, indem Sie den Joystick nach vorn (schneller) oder nach hinten (langsamer) bewegen. (Das Auto kann dabei nur abgebremst, nicht aber ganz angehalten werden.)

Kurz vor der Kreuzung ist ein weißer Strich auf die Straße gemalt. Ab diesem Strich hat man wiederum keine Kontrolle mehr, und das Auto fährt mit der letzten eingestellten Geschwindigkeit(!) weiter. Man kann die eigene Geschwindigkeit also nur vom Verschwinden des schwarzen Balkens bis zu dem weißen Strich beeinflussen.

Ihre Aufgabe besteht darin, eine Kollision mit dem Querverkehr zu vermeiden!

B) Positionierung: In manchen Durchgängen werden Sie nach dem schwarzen Balken in der virtuellen Welt stehen bleiben. Die Autos des Querverkehrs sind dann von der Straße verschwunden und werden stattdessen oberhalb der Straße zur Auswahl angeboten. Mit Hilfe des Joysticks können Sie nun zwischen den Autos wechseln (Links-Rechts-Hoch-Runter) und durch Drücken des Feuerknopfs eines auswählen. Das von Ihnen gewählte Auto erscheint dann in der Mitte der Straße vor Ihnen. Sie können es nun mit dem Joystick verschieben (Links-Rechts) und abstellen (Feuerknopf). Anschließend können Sie mit dem nächsten Auto fortfahren. Ihre Aufgabe besteht darin, die Verkehrssituation so gut wie möglich zu rekonstruieren.

Positionieren Sie dazu bitte die Autos, an die sich erinnern können, möglichst genau!

Ein Zeitbalken am oberen Bildschirmrand zeigt an, wieviel Zeit Sie dazu haben.

In einer zweiten, etwas kürzeren, Phase haben Sie dann noch mal die Möglichkeit die Position der vorher platzierten Autos (wieder mit dem Joystick) zu korrigieren.

WICHTIG: Bitte beobachten Sie in jedem Durchgang die Autos des Querverkehrs so, dass Sie sich optimal darauf vorbereiten, einen möglichen Unfall zu vermeiden.

Die beiden Teilaufgaben A und B werden randomisiert angeboten. Zunächst werden Sie aber beide Aufgaben unter etwas vereinfachten Bedingungen und nacheinander üben können.

Appendix B - Fragebogen

Name:

Datum:

Geb.-Datum:

Fragebogen

Bitte kreuzen Sie diejenige Zahl an, die Ihrer Antwort am ehesten entspricht:

• Wie viel Erfahrung haben Sie mit Computern?

sehr wenig 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr viel

• Wie viel Erfahrung haben Sie mit Computerspielen?

sehr wenig 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr viel

• Wie viel Erfahrung haben Sie im Umgang mit einem Joystick?

sehr wenig 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr viel

• Wie motiviert waren Sie in diesem Experiment?

gar nicht motiviert 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr motiviert

• Wie schwer fanden Sie das Experiment?

Unfallvermeidung: sehr leicht 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr schwer

Positionierung: sehr leicht 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr schwer

• Wie schätzen Sie Ihre Leistung ein?

Unfallvermeidung: sehr schlecht 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr gut

Positionierung: sehr schlecht 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 sehr gut

• Haben Sie die Unterschiede zwischen den unterschiedlich großen Autos bewusst wahrgenommen?

• Wenn ja, haben Sie sich diese Unterschiede rein visuell, oder sprachlich (z.B. „klein“, „mittel“, groß) verdeutlicht?

• Hatten Sie eine bestimmte Strategie, um die Aufgabe zu bewältigen? Wenn ja, welche?

BITTE WENDEN →

• Ist Ihnen aufgefallen dass manche der Autos in manchen Durchgängen während der Überblendung durch den schwarzen Balken um ein Stück versetzt wurden? Bitte kreuzen Sie eine der Antworten an.

- Nein, überhaupt nicht.
- Manchmal hatte ich das Gefühl dass sich etwas verändert hatte.
- Manchmal kam es mir so vor, als wäre ein Auto nicht mehr an der Position wo es vorher war / wo es sein sollte, aber ich war mir nicht sicher.
- Ja, ich war mir sicher.

• Weitere Anregungen / Anmerkungen / Kritik?

Vielen Dank für die Teilnahme!

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei:

Herrn Prof. Dr. Hanspeter A. Mallot für die Betreuung der Arbeit in der Biologie und die Bereitstellung des Arbeitsplatzes.

Herrn Prof. Dr. Andreas Zell für die Betreuung der Arbeit in der Informatik.

Gregor Hardieß für die umfassende Betreuung und Hilfestellung.

Herrn Prof. Dr. Peter Hauck für die Beratung.

Und nicht zuletzt natürlich den Probanden für ihre Zeit Bereitschaft bei meinem Experiment mitzumachen.