

Veränderungsblindheit

Drei explorative Untersuchungen in statischer und dynamischer verkehrsbezogener Umgebung

DISSERTATIONSSCHRIFT

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium

(Dr. rer. nat.)

vorgelegt

der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften

der Technischen Universität Dresden

von

Dipl.-Psych. Sascha M. Dornhöfer

geboren am 16.06.1970 in Köln

Gutachter: Prof. Boris M. Velichkovsky
Prof. Bernhard Schlag
Prof. Heiner Deubel

Eingereicht am: 18.08.2004

Tag der Verteidigung: 19.04.2005

Danksagung

Ohne die Mitwirkung zahlreicher Beteiligter wäre die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen. Mein ausdrücklicher und herzlicher Dank gilt daher folgenden Personen:

Experiment 1: Dr. Pieter J.A. Unema für die Hilfe bei der Planung und für die Programmierung. Jens Helmert für die Durchführung.

Experiment 2: Dr. Pieter J.A. Unema und Dr. Sebastian Pannasch für die Hilfe bei der Entwicklung des Fahrsimulators. Prof. Marcos Fernandez Marin für die Programmierung. Jens Helmert für die Durchführung.

Experiment 3: Tilman J. Gaber für die Hilfe bei der Planung. Dana Kutzner für die Durchführung. Ronald Franke für die Bereitstellung des Labors für videogestützte Modellsimulation und der entsprechenden Technik sowie für die Hilfe bei Modellbau, Kameraarbeit, Beleuchtung und Schnitt. Markus Joos für die Programmierung.

Experimente 1 und 2 wurden von der BMW AG München gefördert. Stellvertretend sei hierfür Dr. Mathias Kopf für die angenehme Zusammenarbeit gedankt.

Alexandra Rothert danke ich für die außerordentliche Hilfe bei der Auswertung aller Experimente und für die Hilfe bei einzelnen Graphiken. Dr. Mathias Rudolf danke ich für die stets zügige Beantwortung aller statistischen Fragen.

Mein besonderer Dank geht an Prof. Boris M. Velichkovsky, dem Betreuer dieser Arbeit - einem verständnisvollen Lehrer, der mir den nötigen Freiraum gab und immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Nationalen und internationalen Kollegen danke ich für die rege Rückmeldung und konstruktive Kritik. Nicht zuletzt danke ich etwa 60 „geduldigen“ Versuchspersonen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Tatsache, dass Veränderungen einer visuellen Szene oft nicht bemerkt werden, auch wenn aktiv danach gesucht wird. Diese sogenannte Veränderungsblindheit tritt dann auf, wenn das „alarmierende“ Bewegungssignal einer Veränderung, z.B. durch einen Lidschlag, verdeckt wird oder der Betrachter von der Veränderung abgelenkt wird. In beiden Fällen kann - mangels Hinweisreiz - die visuelle Aufmerksamkeit nicht zum Ort der Veränderung gelenkt werden.

Nach einer kurzen Einführung werden in Kapitel 2, gewichtet nach deren Relevanz für den empirischen Teil, Augenbewegungen im Allgemeinen, deren Registrierung, Darstellung und psychologische Interpretation erläutert. Darauf aufbauend zeigt Kapitel 3 den Zusammenhang einzelner Augenbewegungen und Veränderungsblindheit auf und bietet einen ausführlichen Überblick über alle Formen von Veränderungsblindheit, Paradigmen zu deren Erzeugung, Faktoren, die diese bedingen und Theorien zur Erklärung des Phänomens. Anschließend werden im empirischen Teil drei explorative Untersuchungen zur Veränderungsblindheit im Kontext des Straßenverkehrs dargestellt.

Experiment 1 (Kapitel 4) zeigte mittels Fotos von alltäglichen Verkehrssituationen, dass natürlich (durch Blicksprünge oder Lidschläge) sowie künstlich (durch Weißblitze, sogenannte "Blanks") verdeckte Veränderungen unterschiedlicher Relevanz seltener (und langsamer) entdeckt wurden als Veränderungen, die während einer Fixation (unverdeckte Kontrollbedingung) dargeboten wurden, also in allen Fällen Veränderungsblindheit vorlag. Von den verdeckten Veränderungen wurden verkehrsrelevante häufiger und schneller entdeckt als verkehrsirrelevante. In allen Unterbrechungsbedingungen wurden Veränderungen, bei denen Objekte auftauchten häufiger und schneller entdeckt als solche bei denen Objekte verschwanden. Die einzelnen Verdeckungsarten zeigten hinsichtlich ihrer Entdeckungsrate und Entdeckungszeit keinen Unterschied. Eine weitere Analyse der Blickbewegungsdaten lieferte darüber hinaus zusätzliche Ergebnisse: Relevante Veränderungen wurden mit zunehmender Distanz zum Fixationsort gleichgut entdeckt, irrelevant schlechter. Nicht nur entdeckte, sondern auch nicht entdeckte Veränderungen gingen, sowohl in der unverdeckten Fixationsbedingung als auch in der Blicksprungbedingung, mit einer deutlichen Verlängerung der phasischen Fixationsdauer einher und liefern somit Anzeichen für eine implizite Veränderungswahrnehmung. Die Probanden befanden sich in der Fixations- und Blicksprungbedingung sowohl unmittelbar vor der Nichtentdeckung als auch unmittelbar vor der Entdeckung deutlich häufiger

auf der ambienten Ebene der visuellen Aufmerksamkeit, auf der Objekte nur oberflächlich verarbeitet und lokalisiert werden. Insgesamt führten die Ergebnisse zu dem Schluss, dass Veränderungsblindheit, unabhängig von der Verdeckungsart, ein Grund für zu späte oder nicht erkannte Gefahren im Straßenverkehr sein kann, wenngleich sie für die gefährlichsten Situationen (auftauchende relevante Veränderungen) deutlich geringer ausfällt und künstliche Blanks sich, zumindest in einer statischen Bedingung, gut zur Simulation von Lidschlägen und Sakkaden eignen.

Da die Ergebnisse aus Experiment 1 ausschließlich in einer statischen Umgebung gewonnen wurden und sich daher mangels ökologischer Validität nicht ohne weiteres auf den Straßenverkehr übertragen lassen, wurden die wichtigsten Aspekte mit Experiment 2 (Kapitel 5) in einer dynamischen Umgebung (Fahr Simulator) untersucht. Es interessierte uns vor allem, inwieweit die tatsächlich gefährlichsten Situationen, also auftauchende verkehrsrelevante Veränderungen, in dieser Umgebung Veränderungsblindheit erzeugen, wenn sie während eines Blanks dargeboten werden. Zu unserem Erstaunen fanden wir keine klassische Veränderungsblindheit. Vielmehr zeigte sich eine höhere Entdeckungsrate (und Entdeckungszeit) für Veränderungen, die während einem Blank auftauchten, verglichen mit der unverdeckten Fixationsbedingung, also ein umgekehrter Effekt von klassischer Veränderungsblindheit. Unter anderem durch eine nachträgliche mündlichen Befragung von Probanden ergab sich der begründete Verdacht, dass der Blank-Vorteil durch Merk- bzw. Abzählstrategien zustande kam. Die Analyse der Blickbewegungen ergab, dass relevante Additionen mit zunehmender Distanz zum Fixationsort in der Blank-Bedingung gleich gut und in der Fixationsbedingung überwiegend gleich gut entdeckt wurden. Diesbezüglich konnten die Ergebnisse aus Experiment 1 also in einer virtuellen dynamischen Umgebung bestätigt werden. In der Fixationsbedingung zeigten sich anhand der phasischen Fixationsdauer erneut deutliche Anzeichen für eine implizite Veränderungswahrnehmung. Bezüglich der Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit befanden sich die Probanden in der Fixationsbedingung auch in der komplexeren dynamischen Umgebung unmittelbar vor der Entdeckung deutlich häufiger auf der ambienten Ebene der visuellen Aufmerksamkeit, vor Nichtentdeckung zeichnete sich zumindest ein Trend in dieselbe Richtung ab. Die Ergebnisse führten zu dem Schluss, dass es bei dem unklaren Blank-Vorteil voreilig und wahrscheinlich falsch ist „Entwarnung“ zu geben und wir vorerst davon abraten, Ergebnisse aus statischen Untersuchungen zur Veränderungsblindheit auf dynamische Umgebungen, z.B. auf den Straßenverkehr zu übertragen.

Die unterschiedlichen Versuchsdesigns der beiden ersten Experimente erlauben keinen direkten Vergleich der widersprüchlichen Ergebnisse. Ein derartiger Vergleich ist jedoch zwingend

notwendig, um Aufschluss über das tatsächliche Ausmaß von Veränderungsblindheit in statischer und dynamischer Umgebung zu erlangen. Daher untersuchten wir in Experiment 3 (Kapitel 6), wie sich Blanks unterschiedlicher Dauer auf die (Nicht-)Entdeckung plötzlich auftauchender oder verschwindender identischer Objekte in einer dynamischen (Filme aus der Perspektive eines Fahrers) und einer vergleichbaren statischen Situation (Standfotos derselben Filme) auswirken. Die Möglichkeit Entdeckungsstrategien zu nutzen wurde eliminiert. Wir fanden sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Bedingung Veränderungsblindheit, also eine geringere Entdeckungsrate (und längere Entdeckungszeit) bei Veränderungen, die während eines Blanks dargeboten wurden, verglichen mit der unverdeckten Kontrollbedingung (kein Blank). Das Ausmaß der Veränderungsblindheit war in der dynamischen Umgebung größer als in der statischen (85% vs. 64%). Die einzelnen Verdeckungsdauern unterschieden sich hinsichtlich der Entdeckungsrate sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Bedingung nicht. Bei den sensibleren Entdeckungszeiten zeigten sich in der statischen Bedingung keine Unterschiede, in der dynamischen Bedingung hingegen dauerte eine Entdeckung mit zunehmender Blank-Dauer länger. Auftauchende und verschwindende Objekte wurden sowohl in statischer als auch in dynamischer Umgebung gleich gut und gleich schnell entdeckt, was wir darauf zurückführen, dass alle potentiellen Veränderungsobjekte bekannt und in Form, Farbe, Größe und Orientierung identisch waren. Eine Bildschirmbefragung ergab, dass sich die Probanden in der statischen Umgebung häufiger an die Art als an der Ort der Veränderung erinnerten, während sich die Leistungen in der dynamischen Umgebung nicht unterschieden. Weiterhin gab die Befragung Hinweise auf eine implizite Veränderungswahrnehmung, wenn auch undeutlichere als in den ersten beiden Experimenten. Der empirische Teil schließt mit der Erkenntnis, dass die in Experiment 1 erörterte Gefahr in Form von Veränderungsblindheit, sich im tatsächlichen, „dynamischen“ Straßenverkehr verstärken wird und einen ernstzunehmenden Grund für zu spät oder nicht erkannte Gefahren darstellt.

Kapitel 7 beschreibt einen universalen Ansatz in Form eines für alle zugänglichen, verwendbaren und weiterentwickelbaren Grund-Versuchsdesigns, das es ermöglichen kann, zukünftige Untersuchungen zur Veränderungsblindheit vergleichbarer zu machen und erörtert abschließend einige Fragen, die sich unmittelbar aus den oben dargestellten Experimenten ergeben und mit dem erwähnten oder einem ähnlichem „Universalinstrument“ untersucht werden können.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Zusammenfassung	III
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einführung	1
2 Augenbewegungen	3
2.1 Anatomisch-funktionelle Grundlagen	3
2.2 Arten von Augenbewegungen.....	6
2.3 Registrierung von Augenbewegungen	11
2.4 Darstellung und psychologische Interpretation von Augenbewegungsdaten	16
3 Veränderungsblindheit	22
3.1 Formen und Paradigmen zur Erzeugung von Veränderungsblindheit	22
3.2 Faktoren, die sich auf Veränderungsblindheit auswirken	29
3.3 Theorien zur Erklärung von Veränderungsblindheit.....	38
4 Experiment 1: Variation von Unterbrechungsart und Relevanz in natürlicher statischer Umgebung	46
4.1 Einleitung	46
4.2 Methode.....	47
4.2.1 Probanden	47
4.2.2 Stimuli und Versuchsdesign	47
4.2.3 Hypothesen	49
4.2.4 Apparatur.....	50
4.2.5 Versuchsdurchführung	51
4.3 Ergebnisse	52
4.3.1 Datenanalyse.....	52
4.3.2 Art der Unterbrechung.....	53
4.3.3 Relevanz	54
4.3.4 Art der Veränderung.....	55
4.3.5 Foveale Distanz	56
4.3.6 Implizite Entdeckung.....	57
4.3.7 Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit.....	59
4.4 Zusammenfassende Diskussion.....	60

5 Experiment 2: Variation der Unterbrechungsart in virtueller dynamischer Umgebung	64
5.1 Einleitung	64
5.2 Methode.....	64
5.2.1 Probanden	64
5.2.2 Stimuli und Versuchsdesign	64
5.2.3 Hypothesen	66
5.2.4 Apparatur	67
5.2.5 Versuchsdurchführung	68
5.3 Ergebnisse	69
5.3.1 Datenanalyse.....	69
5.3.2 Art der Unterbrechung.....	69
5.3.3 Foveale Distanz	70
5.3.4 Implizite Entdeckung.....	71
5.3.5 Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit.....	72
5.4 Zusammenfassende Diskussion.....	73
6 Experiment 3: Direkter Vergleich statischer und dynamischer natürlicher Umgebungen mit Variation der Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung..	77
6.1 Einleitung	77
6.2 Methode.....	77
6.2.1 Probanden	77
6.2.2 Stimuli und Versuchsdesign	77
6.2.3 Hypothesen	82
6.2.4 Apparatur	83
6.2.5 Versuchsdurchführung	85
6.3 Ergebnisse	85
6.3.1 Datenanalyse.....	85
6.3.2 Unterbrechungsdauer.....	86
6.3.3 Art der Veränderung.....	87
6.3.4 Lokalisation vs. Identifikation.....	89
6.3.5 Implizite Erkennung in statischer Umgebung	90
6.4 Abschließende zusammenfassende Diskussion	92
7 Ausblick und offene Fragen	97
8 Literatur.....	102

1 Einführung

Der Film „My Private Idaho“ des amerikanischen Regisseurs Gus van Sant enthält eine dramatische Auseinandersetzung der Darsteller River Phoenix und Keanu Reeves in einer verlassenen Landschaft. Der Zuschauer sieht eine rasante Folge von Einstellungen, in denen die beiden aufgeregt diskutieren. Aus kognitionspsychologischer Sicht ist in dieser Szene vor allem das interessant, was wir nicht sehen: Eine Einstellung von Phoenix zeigt diesen mit einem Stock in der Hand, gefolgt von einer Einstellung von Reeves, in der Phoenix' nun leeren Hände von der Seite zu sehen sind. Trotz des klaren logischen Widerspruchs (plötzliches Verschwinden des Stocks) werden solche Anschlussfehler vom Zuschauer in der Regel nicht wahrgenommen (z.B. Dmytryk, 1984). Dieses als Veränderungsblindheit bezeichnete Phänomen tritt auf, wenn das „alarmierende“ Bewegungssignal einer Veränderung, z.B. das Fallen eines Stocks, nicht zu sehen ist. Das ist immer dann der Fall, wenn die Veränderung zum Zeitpunkt ihres Stattfindens verdeckt ist oder von ihr abgelenkt wird. Das Verschwinden des Stocks beispielsweise wird nicht bemerkt, weil sein mögliches Fallen durch den Schnitt verdeckt worden wäre und weil der durch den Schnitt erzeugte Perspektivwechsel die Aufmerksamkeit des Zuschauers von den Händen Phoenix' auf das Gesicht Reeves' lenkt. Die Veränderung bliebe auch dann mit hoher Wahrscheinlichkeit unbemerkt, wenn der Stock - trotz ständiger Sicht auf die Hände - genau während eines Lidschlags, eines Blicksprungs oder einer künstlichen Unterbrechung der Sicht verschwinden würde. Eine Tatsache, die zunächst schwer zu glauben ist, von der man sich aber bei zahlreichen Vorführungen auf Kongressen zur visuellen Wahrnehmung eindrucksvoll überzeugen kann.

Viele Untersuchungen zeigten in den letzten Jahren, dass das Phänomen der Veränderungsblindheit bei abstraktem, natürlichem, statischem und dynamischem Stimulusmaterial auftritt und durch unterschiedlichste Arten der Sichtunterbrechung und Ablenkung zu erzeugen ist (Rensink, 2002). Nahezu alle Untersuchungen beschränken sich unseres Wissens auf jeweils einen dieser Aspekte - ein systematischer Vergleich unterschiedlicher Unterbrechungsarten oder unterschiedlichen Stimulusmaterials in befriedigender Form steht bisher noch aus. Derartige Vergleiche sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit und dringend notwendig, um z.B. festzustellen, ob sich künstliche Unterbrechungen dazu eignen, natürliche zu simulieren oder inwieweit sich Ergebnisse von Untersuchungen in statischer Umgebung auf dynamische Umgebungen übertragen lassen.

In den folgenden Abschnitten werden nach einer ausführlichen Erörterung von Augenbewegungen und ihrem Zusammenhang mit Veränderungsblindheit drei explorative Untersuchungen zur Veränderungsblindheit im Kontext des Straßenverkehrs vorgestellt. Untersuchung 1 befasst sich mit einem direkten Vergleich dreier unterschiedlicher Unterbrechungsarten bei statischem Stimulusmaterial (Fotos von Verkehrssituationen). Untersuchung 2 repliziert Teile von Untersuchung 1 in dynamischer Umgebung (Fahrsimulator). Untersuchung 3 stellt schließlich einen direkten Vergleich zwischen einer statischen (Fotos von einem Straßenzug) und einer dynamischen Umgebung (Filme von einem Straßenzug) vor. Auszüge der beschriebenen Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht (Dornhöfer et al., 2002, 2003, 2004).

Da diese Arbeit ohne die Vor- und Mitarbeit anderer nicht möglich gewesen wäre, verzichte ich aus Respekt auf die „Ich-Form“.

2 Augenbewegungen

2.1 Anatomisch-funktionelle Grundlagen

Das menschliche Auge ist aus funktioneller Sicht vergleichbar mit einem Fotoapparat oder einer Videokamera. Wie auch die Kamera besitzt das Auge eine automatische Blende mit verstellbarem Durchmesser, die Iris. Sie bestimmt mit Hilfe der Änderung der Pupillenweite, welche Lichtmenge das Auge erreicht. Wie durch ein Objektiv fällt dieses Licht so durch die Augenlinse in das Auge ein, dass ein kleineres auf dem Kopf stehendes Abbild der Außenwelt auf eine lichtempfindliche Oberfläche projiziert wird. Diese als *Retina* bezeichnete Oberfläche besteht aus Millionen feiner lichtempfindlicher Rezeptoren, die auf elektromagnetische Wellen des Lichts reagieren und das Abbild in neuronale Aktivität umwandeln. Die neuronalen Signale werden dann komprimiert über dünne Nervenfasern zum Sehnerv an der Rückwand des Auges und von dort aus in das Gehirn geführt, in dem zahlreiche subkortikale und kortikale Strukturen daraus eine wahrnehmbare interne Repräsentation der Außenwelt „berechnen“.

Im Gegensatz zu einer Kamera, die hochauflösende farbige Bilder ihres gesamten „Sehbereichs“ auf dem Filmmaterial abbildet, ist das Auge von geringerer physikalisch-optischer Qualität. Lediglich auf der *Fovea*, einem sehr kleinen Bereich von etwa 1,5 mm Durchmesser (Rodiek, 1998), etwa auf Höhe des Sehnervs, ist die retinale Auflösung bei Tageslicht maximal. Dort befinden sich ausschließlich *Zapfen-Rezeptoren*, die überwiegend die Wahrnehmung von farbigem Tageslicht ermöglichen (Rodiek, 1998). Eine sehr hohe Packungsdichte und eine 1:1 Verschaltung mit den Nervenzellen des Sehnervs (Rodiek, 1998) erlauben dort zusätzlich das schärfste Sehen. Außerhalb der Fovea dominieren mit zunehmender Entfernung die lichtempfindlicheren *Stäbchen-Rezeptoren*, die überwiegend bei Dämmerung aktiv sind und monochromes Licht verarbeiten. Sie sind nur in einem Verhältnis von 100:1 mit den Nervenzellen des Sehnervs (Rodiek, 1998) verschaltet und daher entsprechend weniger hochauflösend. Durch die abnehmende Zapfendichte außerhalb des fovealen Bereichs wird dort auch die Sehschärfe und Farbtiefe zunehmend geringer. Eine Ausstattung der gesamten Retina mit dem hochauflösenden „Luxussystem“ der Fovea ist unmöglich, da es den Sehnerv um das zweihundertfache vergrößern würde und die somit anfallende Informationsmenge für das Gehirn nicht mehr zu bewältigen wäre (Carpenter, 1988). Abbildung 2.1 A illustriert die visuelle Auflösung des menschlichen Auges und verdeutlicht den qualitativen Unterschied zur Kamera (Abbildung 2.1 B).

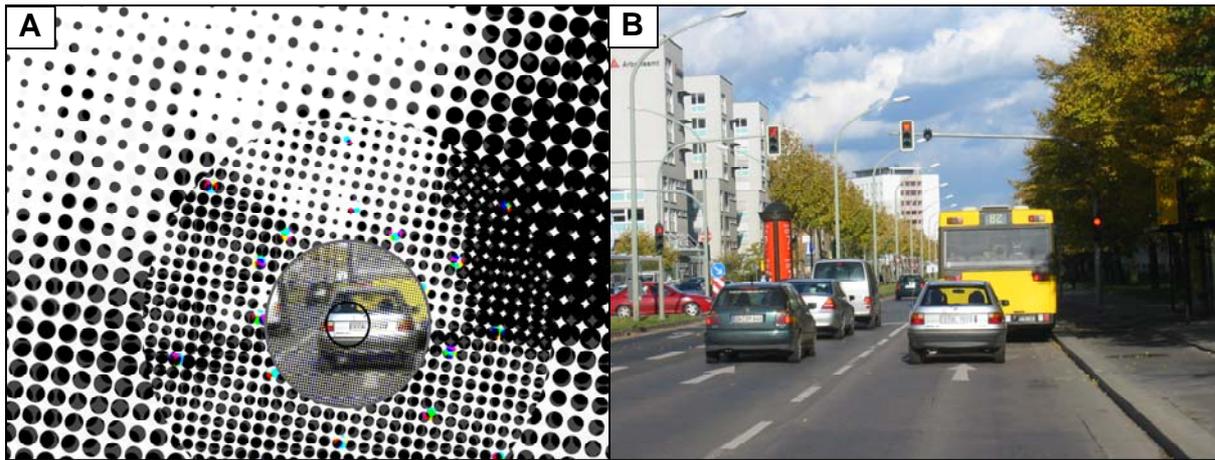


Abbildung 2.1. Visuelle Auflösung des menschlichen Auges (A), im Vergleich zur Kamera (B).

Bei jeder Fixation eines Objektes im Raum (in Abbildung 2.1 A das bremsende vorausfahrende Fahrzeug) wird dieses automatisch auf der Fovea beider Augen abgebildet. Der foveale Bereich umfasst maximal 2° im Durchmesser (entspricht in etwa der Breite eines Daumens bei einem ausgestreckten Arm). In einer angrenzenden, sogenannten parafovealen Region von bis zu 8° im Durchmesser (siehe hierzu auch Rayner & Pollatsek, 1989) ist farbloses und unschärferes Sehen möglich. In der Peripherie liegende Objekte können nur noch sehr grob und farblos wahrgenommen werden. Diese Unschärfe der Umgebung wird uns in der Regel jedoch nicht bewusst, da wir durch einen ökonomischen Trick unseres visuellen Systems – die Augenbewegungen - jederzeit einen beliebigen Ort der Umgebung mit voller Schärfe betrachten können. Interessierende Objekte in der Peripherie des Sehfeldes werden dazu mit Hilfe von kleinen reflexartigen Blicksprüngen, sogenannten *Sakkaden*, zur *Fixation* in den fovealen Bereich „gerückt“. Um die Umwelt stetig detailliert und farbig wahrzunehmen, sind Augenbewegungen eine wichtige Voraussetzung.

Drei Hirnnerven (Hirnnerv 3, 4 und 6 – Galley, 2001) erzeugen die Bewegungen der beiden Augäpfel mittels dreier verschiedener Muskelpaare (Abbildung 2.2). Zwei gerade Muskelpaare drehen den Augapfel in horizontaler und vertikaler Richtung. Bei einer Kombination der beiden Richtungen sind auch diagonale Bewegungen möglich. Ein schräges Muskelpaar ermöglicht darüber hinaus die seltenere Außen- und Innenrotation des Auges. Bei jeder Bewegungsform sind alle Muskeln durch Spannung und Erschlaffung beteiligt. Die Augenmuskelfunktionen sind aufgrund struktureller Besonderheiten äußerst schnell und präzise. Eine Nervenfasern versorgt ca. sechs Fasern eines Augenmuskels. In den Fingermuskeln hingegen versorgt eine Nervenfasern bis zu 300 Muskelfasern, in anderen Muskeln oft über 1500 Fasern (Kahle, 1991). Beide Augen können entweder konjugiert, d.h. parallel geführt werden oder

sich, um Tiefensehen zu ermöglichen, gegeneinander verstellen (also entweder konvergieren oder divergieren).

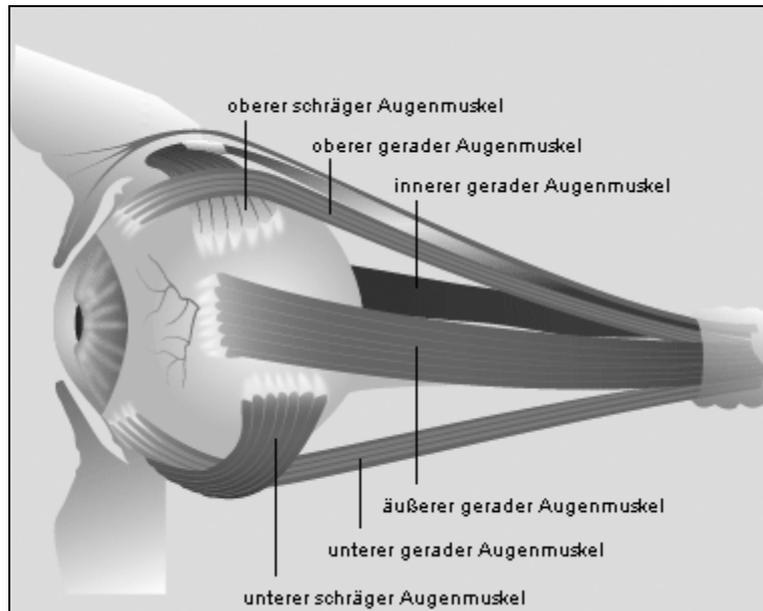


Abbildung 2.2. Lage der sechs Augenmuskeln in der Augenhöhle (modifiziert nach Olek et al., 2003).

Augenbewegungen werden von zahlreichen miteinander vernetzten Hirnstrukturen kontrolliert und gesteuert. Während die beteiligten Hirnstammstrukturen bereits gut erforscht sind, liegt über die Beteiligung subkortikaler und kortikaler Strukturen vergleichsweise wenig Information vor (Deubel, 1994). Eine ausführliche Darstellung der beteiligten Mechanismen für alle Augenbewegungsarten findet sich bei Goldberg et al. (1991).

Abbildung 2.3 A zeigt die wichtigsten zentralnervösen Strukturen für die Steuerung von Sakkaden (und Fixationen). Die visuelle Information kann nach Deubel (1994) auf mindestens vier Wegen zum *Sakkadengenerator* (SG) im Hirnstamm gelangen, in dem okulomotorische Neuronen die Augenmuskeln innervieren (Abbildung 2.3 B). Erstens direkt aus der Retina über den Superior Colliculus (SC), zweitens über das Corpus Geniculatum Laterale (LGN), den primären visuellen Cortex (V1) und den SC, drittens über das LGN, V1 und die frontalen Augenfelder (FAF) und viertens über das LGN, V1 und den extrastriären visuellen Cortex (V2-V4), den posterioren parietalen Cortex (PPC) und die FAF. Diesen verschiedenen Verarbeitungswegen lassen sich qualitativ unterschiedliche Funktionen zuordnen. So werden auf den beiden ersten Wegen unwillkürliche, reflexartige Sakkaden mit sehr kurzen Reaktionszeiten und auf den beiden längeren Wegen willentlich gesteuerte Sakkaden mit entsprechend längeren Reaktionszeiten erzeugt.

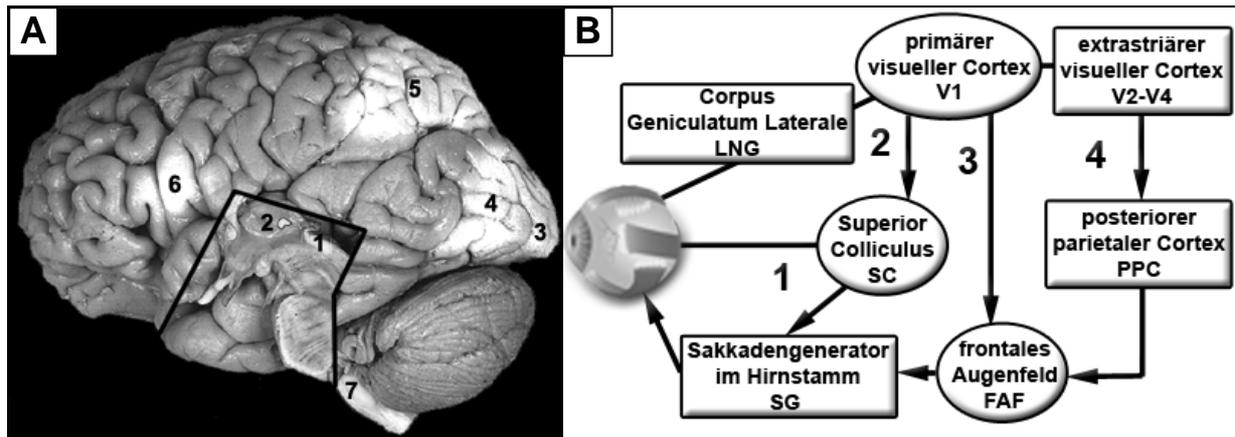


Abbildung 2.3. Die wichtigsten zentralnervösen Strukturen, die bei der Steuerung von sakkadischen Augenbewegungen beteiligt sind. (A) hirntopographische Zuordnung: 1=Superior Colliculus, 2=Corpus Geniculatum Laterale, 3=primärer visueller Cortex, 4=extrastritärer visueller Cortex, 5=posteriorer parietaler Cortex, 6=frontales Augenfeld, 7=Sakkadengenerator im Hirnstamm; (B) schematische Darstellung von vier möglichen Wegen des Informationsflusses durch die beteiligten Strukturen (modifiziert nach Deubel, 1994).

Keines der drei Zentren (V1, SC und FAF) der beschriebenen Wege ist bei der Generierung von Sakkaden unverzichtbar. Mindestens zwei müssen gleichzeitig ausgeschaltet werden, um sakkadische Augenbewegungen vollständig zu eliminieren (z.B. Schiller et al., 1980). So können manche Patienten trotz zerebral bedingter Teilblindheit überzufällig häufig richtig mit Sakkaden auf visuelle Reize reagieren, die in ihrem ausgefallenen visuellen Feld dargeboten werden (Blindsight-Phänomen - z.B. Weiskrantz, 1996).

2.2 Arten von Augenbewegungen

Wesentliche Beiträge zur Augenbewegungsforschung wurden nach Heller (1988) bereits im Mittelalter geleistet. Arabische Forscher, z.B. Ibn al Haytham verfügten demnach schon im 13. und 14. Jahrhundert über detaillierte Kenntnisse der Anatomie und Optik des Auges und forschten über Augenbewegungen beim Lesen. Dennoch dauerte es etwa 500 Jahre, bis entdeckt wurde, dass mehr als eine Art von Augenbewegungen existiert. Zwar beschäftigten sich beispielsweise Donders (1847), Wundt (1862) und Helmholtz (1866) zum Beginn der modernen Humanwissenschaften eingehend mit den Bewegungen der Augen, aber erst im Jahre 1878 entdeckte Javal (siehe hierzu Javal, 1905), dass das Auge beim Lesen nicht ruhig eine Zeile verfolgt, sondern kleine ruckartige Bewegungen (Sakkaden) macht, die jeweils von kleinen Pausen zur Informationsaufnahme (Fixationen) unterbrochen werden. Schließlich konnte Dodge (1903) fünf - noch immer aktuelle - funktionell verschiedene Bewegungen des

Augapfels klassifizieren: Zwei stabilisierende Augenbewegungen (vestibuläre und optokinetische Reflexe), die das retinale Abbild trotz Bewegung des Kopfes oder der Umwelt stabil halten und drei zielsuchende Augenbewegungen (Sakkaden, Folgebewegungen und Vergenzbewegungen), die das Auge gezielt auf ein Objekt ausrichten. Zur Mitte des 20. Jahrhunderts berichteten unter anderen Lord & Wright (1948) von zusätzlichen Mikrobewegungen des Auges, die während einer Fixation stattfinden. Weitere von der Bewegung des Augapfels unabhängige Bewegungen am Auge sind Linsen- und Pupillenbewegungen sowie Lidschläge. Alle erwähnten Augenbewegungsarten sind mit ihrer Funktion in Tabelle 2.1 zusammengefasst und werden entsprechend ihrer Relevanz für den empirischen Teil der vorliegenden Arbeit kurz erläutert.

Tabelle 2.1. Arten von Augenbewegungen und ihre Funktion

Augenbewegung	Funktion
stabilisierende Bewegungen	
Vestibulärer Reflex	Stabilisierung des retinalen Abbildes bei Kopf- und Körperbewegungen
Optokinetischer Reflex	Stabilisierung des retinalen Abbildes bei großflächigen Bewegungen der Umwelt
zielsuchende Bewegungen	
Sakkaden	Objekte aus der Peripherie zur Fixation auf die Fovea „rücken“
Folgebewegungen	Verfolgung eines sich bewegenden Objektes
Vergenzbewegungen	Ausrichtung der Augen auf Objekte in der Tiefe
Mikrobewegungen	
Drift	Aufrechterhaltung der Stimulation der Rezeptoren
Mikrosakkade	Repositionierung des Auges auf das vorher fixierte Objekt
Bewegungen am Auge	
Linsenbewegungen	Scharfstellung (Akkommodation)
Pupillenbewegungen	Lichtmengenregulation
Lidschlag	Schutz der Hornhaut vor Austrocknung und Fremdkörpern

Der *vestibuläre Reflex* wird vom Gleichgewichtsorgan im Innenohr (Vestibulum) gesteuert und innerhalb von 14 ms (Goldberg, 1991) ausgeführt. Er hält bei Bewegungen des Kopfes bzw. Körpers das Abbild auf der Retina stabil. Bei jeder Beschleunigung des Kopfes bewirkt

er dazu eine langsam driftende Korrekturbewegung in die entgegengesetzte Richtung. Bei ausreichend großen Bewegungen (z.B. bei einer Pirouette) kommt es zusätzlich zu einer schnellen Rückstellsakkade.

Der *optokinetische Reflex* wird innerhalb von 20 ms (Bollmann, 1999) von großflächigen Bewegungen der Umwelt ausgelöst und sorgt dafür, dass ein Großteil des Bildes auf der Retina fixiert bleibt. Er ist z.B. dann zu beobachten, wenn man aus einem fahrenden Zug die Landschaft betrachtet. Die Augen fixieren in diesem Fall einen Punkt und führen eine langsame Driftbewegung entgegen der Fahrtrichtung aus. Kurz bevor der fixierte Punkt verschwindet, sucht sich das Auge durch eine Rückstellsakkade einen neuen Fixationspunkt. Ein periodischer Wechsel von langsamen Drifts mit einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 80°/s (Unema, 1995) und schnellen Rückstellsakkaden mit einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 500°/s (Joos et al., 2003), wie er sich bei vestibulären und optokinetischen Reflexen findet, wird als Nystagmus bezeichnet.

Mit den bereits erwähnten *Sakkaden* werden unscharfe Objekte sprunghaft aus der Peripherie zur Fixation auf die Fovea gebracht. In der Fixationsphase, in der sich das Auge in relativem Stillstand befindet, wird die visuelle Information aufgenommen. Es folgt eine weitere Sakkade, gefolgt von einer erneuten Fixation. Dieser Zyklus setzt sich kontinuierlich fort. Sakkaden werden etwa vier mal pro Sekunde initiiert und stellen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 1000°/s (die Geschwindigkeit steigt mit der Sprungweite – Robinson, 1964) die schnellsten motorischen Bewegungen des menschlichen Körpers dar (Unema, 1995). Die enorme Geschwindigkeit ist auch die Hauptursache dafür, dass während einer Sakkade fast keine visuelle Information aufgenommen wird. Mit Hilfe der sakkadischen Unterdrückung (siehe auch Matin, 1974; Deubel et al., 2002) verhindert unser Gehirn die störende Wahrnehmung der schnellen Verschiebung des kompletten retinalen Abbildes. Wir empfinden eine visuell stabile Welt, ohne die Verschiebungen auf der Retina zu bemerken (zur visuellen Stabilität während sakkadischer Augenbewegungen siehe z.B. Bridgeman et al., 1994; Mc Conkie et al., 1996). Schaut man z.B. in einen Spiegel und blickt abwechselnd auf das eigene linke und rechte Auge, wird man keine Bewegung der Augen, aber auch keine ruckartig verschobene „Welt“ beobachten (Dodge, 1900). Auch bis zu 75 ms vor und bis zu 50 ms nach einer Sakkade ist die visuelle Wahrnehmung eingeschränkt (Matin, 1974; Diamond et al., 2000). Weiterhin sind Sakkaden ballistisch, d.h. nach ihrer Initiierung lassen sich Verlauf und Zielort nicht mehr beeinflussen (Unema, 1995). Sie erreichen eine Sprungweite (Sakkadenamplitude) von 2° bis 50° (Becker, 1991), wobei 85% aller natürlichen Sakkaden unter 15° liegen (Lancaster, 1941). Ihre Dauer steigt mit der Amplitude und beträgt zwischen 10 ms und

80 ms (Unema, 1995). Sakkaden sind räumlich sehr präzise. Der absolute Fehler beträgt zwischen 5% und 10% der Amplitude, mit der deutlichen Tendenz das Ziel zu unterschätzen (Deubel, 1994). Bei Sakkaden mit größeren Amplituden wird dieser Fehler mittels kleiner Korrektursakkaden ausgeglichen (Carpenter, 1988). Die Sakkadenlatenz, also die Zeit, die nach einer „Reizung“ vergeht, bis eine Sakkade ausgelöst wird, liegt im Mittel zwischen 180 ms und 240 ms (Deubel, 1994). Unter besonderen Umständen treten auch sehr kurze Latenzen von weniger als 100 ms auf. Dies geschieht vor allem beim sogenannten „Gap-Paradigma“ (Saslow, 1967), wenn ein fixiertes Blickobjekt ca. 150 ms vor dem Erscheinen eines peripheren Zielobjektes plötzlich von der Fovea verschwindet. Sakkaden mit diesen kurzen Latenzen werden als Express-Sakkaden bezeichnet, weil sie ihr Ziel sehr schnell erreichen, wobei dies nicht aufgrund einer erhöhten Geschwindigkeit der Augenbewegung, sondern aufgrund einer kürzeren Bearbeitungszeit im Gehirn geschieht (Fischer et al., 1984). Sakkaden können sowohl spontan und unwillkürlich, beispielsweise durch Veränderungen in der Peripherie als auch willentlich ausgelöst werden. Letzteres macht sie und vor allem die umgebenden Fixationen zu psychologisch wertvollen Augenparametern, die aufschlussreiche Informationen über Aufmerksamkeitsprozesse liefern. Diese wichtige Rolle wird in Abschnitt 2.4 ausführlich erläutert.

Folgebewegungen werden überwiegend willentlich ausgelöst, um ein bewegtes Objekt vor einem statischen oder ebenfalls bewegten Hintergrund (z.B. im Straßenverkehr) zu verfolgen. Da das sich bewegende Objekt auf der Fovea fixiert wird und entsprechend visuelle Informationen aufgenommen werden, spricht man auch von dynamischen Fixationen. Die Folgebewegungen lösen im allgemeinen eine anfängliche Sakkade zu dem bewegten Objekt ab (Bollmann, 1999) und erreichen eine Höchstgeschwindigkeit von $100^\circ/\text{s}$ (Goldberg, 1991). Die Latenz beträgt etwa 100 ms bis 150 ms (Merrison & Carpenter, 1995). Da die Fixation eines Objektes gegen einen Hintergrund ständiger Rückkopplung bedarf, nimmt die Genauigkeit mit zunehmender Geschwindigkeit deutlich ab (Unema, 1995). Folgebewegungen können auch ohne visuellen Reiz, z.B. auditiv, ausgelöst werden (siehe hierzu z.B. Gottschalk et al., 1977; Leigh & Zee, 1980).

Vergenzbewegungen sind die einzigen Augenbewegungen, bei denen die Augen nicht parallel geführt werden, sondern sich gegeneinander verstellen. Durch die Abbildung eines Objektes auf der Fovea beider Augen ermöglichen sie das stereoskopische bzw. räumliche Sehen. Bei einem Blickwechsel von einem Punkt in der Ferne auf ein Objekt in der Nähe verstellen sich die optischen Achsen beider Augen zueinander (Vergenz). Bei anschließendem Blick in die Ferne verstellen sich die Achsen entsprechend auseinander (Divergenz). Vergenzbewegungen

weisen eine Latenz von 150 ms bis 200 ms auf und sind mit einer Geschwindigkeit von maximal $10^\circ/s$ sehr langsam (Bollmann, 1999). Die Frage, ob es Vergenz-Sakkaden oder nur langsame Vergenzbewegungen gibt, ist nicht geklärt (Galley, 2001).

Während einer Fixation befindet sich das Auge nicht in absolutem Stillstand, sondern zeigt in der Regel Mikrobewegungen mit einer Amplitude unter zehn Winkelminuten (Joos et al., 2003). Sie spielen eine große Rolle bei der Aufrechterhaltung des Sehens. Da die Rezeptoren der Retina primär auf Veränderungen reagieren, müssen sie kontinuierlich gereizt werden. Stabilisiert man das retinale Abbild, z.B. durch künstliche Lähmung der Augenmuskeln oder durch optische Stabilisierung des Bildes auf der Netzhaut, verschwindet das wahrgenommene Bild durch Rezeptorenermüdung innerhalb weniger Sekunden vollständig (Ditchburn & Ginsborg, 1952). Der *Drift*, eine langsame Abgleitung des Auges vom Fixationsort während der fort dauernden Fixation, bewirkt, dass sich die Retina fortwährend um einen Bereich mehrerer Rezeptoren verschiebt. Dadurch trifft der Lichtreiz stets auf unterschiedliche Rezeptorzellen und gewährleistet so die Sensitivität gegenüber dem optischen Reiz.

Jeder Driftbewegung folgt eine *Mikrosakkade*, die die verursachte Verschiebung korrigiert. Der periodische Wechsel von Drifts und Mikrosakkaden wird auch als physiologischer Nystagmus bezeichnet (Palmer, 1999). Mikrobewegungen lassen sich z.B. beim Betrachten von Nachbildern gut beobachten (Verheijen, 1961).

Neben den Bewegungen des Augapfels - zur Abgrenzung oft auch als Blickbewegungen bezeichnet - zählen auch die Bewegungen am Auge zu den Augenbewegungen. Bei einem *Lidschlag* wird das Auge kurzzeitig durch die Augenlider verschlossen und dadurch mit einem Tränenfilm überzogen, wodurch die Hornhaut vor dem Austrocknen bewahrt wird. Da Lidschläge vermehrt bei großen Sakkaden und Kopfbewegungen vorkommen, sehen Haberich & Fischer (1958) eine zusätzliche Funktion des spontanen Lidschlags in der Ausschaltung störender Scheinverschiebungen. Weiterhin unterscheidet man den reflektorischen Lidschlag als Schutzreflex des Auges auf störende Reize und den willkürlich ausgeführten Lidschlag. Bei einem gesunden Menschen zeigen sich Lidschläge mit einer mittleren Dauer von 150 ms durchschnittlich 12 bis 15 mal pro Minute (Barbato et al., 2000), wobei die Lidschlagrate und -dauer je nach Aufmerksamkeitszustand stark variieren kann (siehe Abschnitt 2.4). Ein ausführlicherer Überblick über weitere messbare Lidschlagparameter findet sich bei Galley (2001).

Pupillenbewegungen bewirken reflektorisch die Regulation der in das Auge einfallenden Lichtmenge. Beide Pupillen können sich bei Lichteinfall mit einer Latenz von 250 ms auf

minimal 1,5 mm verengen, auch wenn das Licht nur in ein Auge fällt (konsensueller Pupillenreflex). Bei Dunkelheit erweitern sich die Pupillen mit einer Latenz von 430 ms um maximal 8 mm (Galley, 2001). Eine ausführliche Zusammenschau der in der Literatur beschriebenen Einflüsse auf den Durchmesser der Pupille findet sich in Rößger (1997).

Linsensbewegungen bewirken durch die Änderung der Brechkraft eine Verschiebung des Bereichs des Scharfsehens im Raum. So erhöht sich die Brechkraft bei der Linsenkrümmung, damit nahe Objekte scharf auf der Retina abgebildet werden, während bei entfernteren Objekten eine Scharfstellung (Akkommodation) durch entsprechende Linsenspannung erreicht wird. Die Akkommodation weist eine Latenz von etwa 300 ms auf (Menozzi & Krueger, 1997) und ist überwiegend reflektorisch, kann aber auch willentlich beeinflusst werden (McLin & Schor, 1988).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die hier getrennt dargestellten Augenbewegungsarten im alltäglichen Leben nicht isoliert, sondern kombiniert auftreten.

2.3 Registrierung von Augenbewegungen

Seit etwa 100 Jahren wird versucht, Augenbewegungen mittels verschiedenster Methoden objektiv zu erfassen. Im Folgenden wird die Entwicklung der wichtigsten Meßmethoden- und geräte kurz in einem geschichtlichen Abriss dargestellt und miteinander verglichen. Ausführliche Überblicke über Registriermethoden finden sich bei Young & Sheena (1975) und Joos et al. (2003).

Bereits im neunzehnten Jahrhundert nutzten Helmholtz (1866) und Lamansky (1869) die *Analyse retinaler Nachbilder*, um Augenbewegungen indirekt zu erfassen. Zum Beispiel wurde ein Proband aufgefordert, nach der Erzeugung eines Nachbildes durch eine helle Lichtquelle, ein räumlich von der Lichtquelle entferntes Objekt zu betrachten. Aus der, bei der Betrachtung dieses Objektes, angegebenen Lage des Nachbildes konnte auf den Verlauf des Blickes geschlossen werden. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass es nur bei relativer Dunkelheit eingesetzt werden kann, die Probanden mitunter unangenehm hellen Lichtreizen ausgesetzt werden und man auf die Introspektion der Probanden angewiesen ist. Weiterhin begrenzt das Abklingen der Nachbilder die Dauer der untersuchbaren Bewegungssequenzen. Etwa genauso alt, jedoch technisch einfacher und jederzeit anwendbar, ist die *direkte Beobachtung* von Augenbewegungen, mittels derer Javal 1878 bereits die Sakkaden entdeckte (siehe Abschnitt 2.2). Für erfahrene Beobachter sind hierbei Bewegungen des Augapfels von etwa 1° zu erkennen (Yarbus, 1967). Anwendung findet die direkte Beobachtung von Augenbewe-

gungen heute vor allem im medizinischen Bereich, um schnell festzustellen, ob bestimmte Arten von Augenbewegungen ausgeführt werden können und bestimmte Reflexe vorhanden sind.

Um genauere und objektivere Daten zu gewinnen, wurde um die Jahrhundertwende mit der Entwicklung zahlreicher *mechanischer Methoden* begonnen (siehe hierzu auch Gutjahr, 1964). So spannte z.B. Huey (1898) den Kopf seiner Probanden fest und befestigte eine Vorrichtung direkt auf der Hornhaut, die mit einer Schreibborste die Bewegungen des Augapfels aufzeichnete. Buys & Coppez (1909) befestigten einen mit einem mechanischen Hebelsystem verbundenen Glasstab am Oberlid ihrer Probanden, um die so optisch vergrößert dargestellte Verschiebungen der Hornhaut systematisch zu beobachten. Derartige invasive Methoden beinhalten eine hohe und unangenehme physische Belastung für den Probanden und beeinflussen zum Teil ihr natürliches Blickverhalten. Bis auf eine modernere und weiter unten angeführte Ausnahme (Kontaktlinsenmethode) rechtfertigt ihr Nutzen nicht den Aufwand. Schnell traten daher *optische Methoden* an Stelle der mechanischen. Dodge & Cline (1901) entwickelten als erste ein *photographisches System*, bei dem von der Hornhaut (Cornea) reflektiertes Licht von einem bewegten lichtempfindlichen Blechstreifen aufgezeichnet wurde, die sogenannte *Cornea-Reflex-Methode*. Mit diesem später weiterentwickelten „Prototyp“ moderner Systeme konnten sie bereits die fünf klassischen Arten von Augenbewegungen identifizieren (siehe Abschnitt 2.2). Das System zeichnete bei fixiertem Kopf und mit begrenzter Auflösung ausschließlich horizontale Blickbewegungen in einem Bereich von etwa 40° auf. Judd et al. (1905) filmten das Auge erstmals mit einer Kamera und registrierten so gleichzeitig Bewegungen des Auges in alle Richtungen. In den folgenden 40 Jahren wurden die Cornea-Reflex-Methode und die *Film-Methode* miteinander verbunden und stetig weiterentwickelt (siehe hierzu auch Mackworth & Mackworth, 1958). Nach dem zweiten Weltkrieg entwickelten sich mit einer Flut zusätzlicher Techniken die modernen Methoden der Augenbewegungsregistrierung.

Weit verbreitet ist das auf Schott (1922) und Meyers (1929) zurückgehende *Elektrookulogramm* (EOG). Hierbei wird die Dipoleigenschaft des Augapfels ausgenutzt und die Veränderung der elektrischen Potentialdifferenzen (bis zu einem Millivolt – Carpenter, 1988) zwischen Retina (negativer Pol) und Cornea (positiver Pol) gemessen. Durch Elektroden, um das Auge herum angebracht, werden die Potentialschwankungen registriert, die durch die Bewegung des Augapfels entstehen. Das vergleichsweise kostengünstige EOG registriert horizontale Bewegungen bis zu 30° gut (Issing et al., 1986), die Aufzeichnung vertikaler Bewegungen werden jedoch, unter anderem durch Lidbewegungen, erheblich gestört (z.B. Chioran &

Yee, 1991). Eine sehr hohe zeitliche Auflösung (Abtastrate bis zu 1000 Hz) erlaubt die blickkontingente Darbietung von Reizen (z.B. während einer Sakkade) und die Messung von Sakkadengeschwindigkeiten (zumindest im horizontalen Bereich). Weiterhin ist das EOG das einzige System, das eine Messung bei geschlossenen Augen ermöglicht. Die räumliche Auflösung fällt mit bis zu $1,5^\circ$ eher gering aus (Galley, 2001), so dass sehr kleine Sakkaden, wie wir sie beispielsweise beim Betrachten zweier aufeinander folgender Buchstaben eines Wortes machen, nicht erfasst werden können. Probanden werden in ihrem Blickfeld durch die Abnahme des EOGs nicht eingeschränkt und Augenbewegungen von Personen, die eine Brille oder Kontaktlinsen tragen, können problemlos aufgezeichnet werden. Das EOG ist allerdings sehr störanfällig und eignet sich nicht zur Blickortanalyse (siehe hierzu auch Galley, 2001).

Die genauesten aber auch aufwendigsten Formen der modernen Augenbewegungsregistrierung stellen *Kontaktlinsenmethoden* dar, bei denen den Probanden individuell angefertigte, rutschfeste Saugkappen auf die anästhetisierte Cornea aufgesetzt werden. Um das Auge des Probanden nicht zu schädigen, sind sie mit Sorgfalt anzuwenden (siehe hierzu z.B. Issing et al., 1986). Die Tragedauer ist wegen möglicher Hornhautirritationen auf höchstens 60 Minuten pro Woche begrenzt (Galley, 2001). Zwei Varianten zur Bestimmung der Augenbewegungen sind hierbei üblich. Bei der ersten Variante, die Yarbus 1967 für seine Blickpfad-Pionierarbeiten (siehe Abschnitt 2.4) nutzte, ist auf der Kontaktlinse ein Spiegel angebracht, der eingestrahktes Licht (anstelle der Cornea bei der Cornea-Reflex-Methode) auf einen lichtempfindlichen Schirm reflektiert. Die zweite, sogenannte *Magnetokulographie* ist eine auf Robinson (1963) zurückgehende Weiterentwicklung der Yarbus-Methode auf elektromagnetischer Basis. Hier wird in einer, in einem magnetischen Wechselfeld liegenden, Spule eine Spannung induziert. Entweder werden Spulen am Kopf des Probanden angebracht oder der Kopf des Probanden befindet sich in einem Rahmen, an dem Spulen für jede Raumrichtung ein magnetisches Wechselfeld erzeugen. An der Kontaktlinse sind eine oder mehrere kleine Spulen untergebracht. Die dort induzierten Spannungen, die sich proportional mit der Lage der Spulen im Feld verändern, werden gemessen. Die Magnetokulographie wurde inzwischen mehrfach verbessert (Ferman et al., 1987) und erlaubt, bei der Verwendung eines Bissbrettes zur Vermeidung von Kopfbewegungen, die dynamische Aufzeichnung von kleinsten multidimensionalen Augenbewegungen mit höchster zeitlicher (1000 Hz) und räumlicher ($0,1^\circ$) Auflösung. Allerdings ist nur in einem Bereich von 10° eine verzerrungsfreie Aufzeichnung möglich (Galley, 2001). Wegen ihrem großen Vorbereitungsaufwand und vor allem ihrer Invasivität blieb sie bisher eine reine Labormethode.

Moderne nicht-invasive Methoden nutzen typische Charakteristika des Auges bei einfallendem infraroten Licht, die optisch gut erkennbar sind und seit den 1980er Jahren mit kleinen Videokameras erfasst werden können. Die Videosignale werden einer rechnergestützten Verarbeitung zugeführt, die die charakteristischen Merkmale des Augenbildes extrahiert und speichert (siehe hierzu auch Joos et al., 2003). Mit entsprechender Software ist auch eine Online-Darstellung des Fixationsverhaltens möglich. Bei kopfgestützten (zum Teil tragbaren) *videobasierten Systemen* (Abbildung 2.4 A) sind zwei am Kopfgestell angebrachte Augenkameras auf die beiden Augen ausgerichtet und erfassen so die Augapfelbewegungen relativ zum Kopf, in der Regel Lidschläge und bei einigen Modellen auch den Pupillendurchmesser.

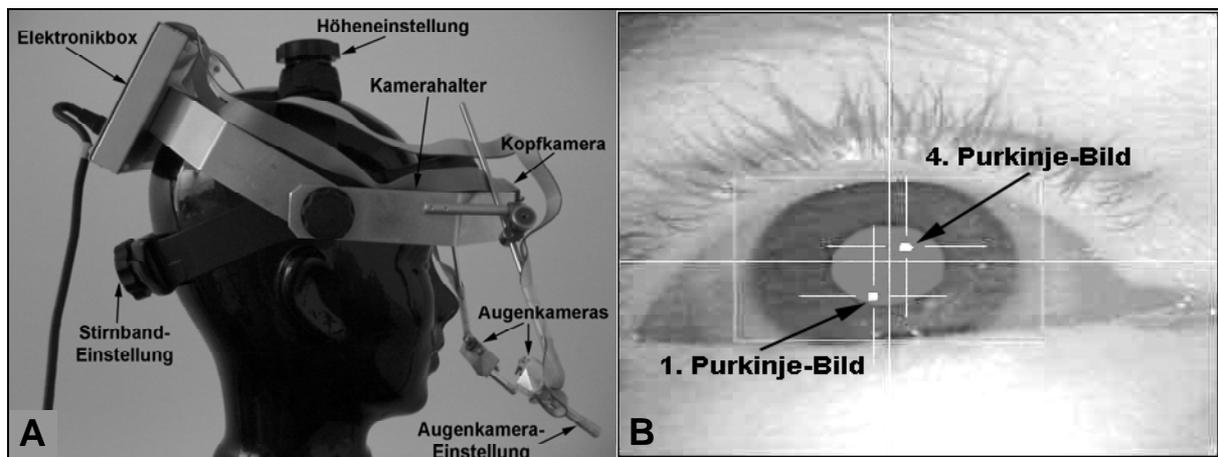


Abbildung 2.4. (A) Kopfgestütztes EyeLink-I System der Firma SR Research, Ltd., wie es für die vorliegende Arbeit verwendet wurde. (B) Systemerfassung der Pupillenmitte und zweier Purkinje-Bilder (modifiziert nach Stampe & Reingold, 2002). Pupillenmitte und viertes Purkinje-Bild werden bei der Blickachsenmessung als Bezugspunkte verwendet, erstes und viertes Purkinje-Bild bei Purkinje-Systemen, nur die Pupillenmitte bei der Pupillenregistrierung und nur das erste Purkinje-Bild bei der Corna-Reflex-Methode.

Beim Einsatz beider Augenkameras sind zudem Vergenzbewegungen (Abschnitt 2.2) registrierbar. Um Kopfbewegungen zu registrieren und zu kompensieren oder das Sichtfeld des Probanden zusätzlich „online“ zu filmen, verfügen manche Systeme über eine dritte nach vorn gerichtete Kamera - ein Bissbrett zur Fixierung des Kopfes wird dann überflüssig. Bei berührungslosen Systemen wird das Auge von einer entfernt angebrachten Kamera, z.B. unter dem Darbietungsmonitor, gefilmt. Inzwischen sind videobasierte, kommerzielle Systeme erhältlich, die mit einer zeitlichen Auflösung bis zu 500 Hz und mit einer räumlichen Auflösung bis unter $0,5^\circ$ multidimensionale Augenbewegungen in einem Bereich bis 30° bei zufriedenstellender Kompensation von Kopfbewegungen registrieren (z.B. das EyeLink-II System von SR-Research Global Inc.). Um artefaktfreie Daten zu gewährleisten, müssen alle modernen

Geräte mit unterschiedlichen Routinen individuell auf den Probanden eingestellt (kalibriert) und während einer Untersuchung unterschiedlich oft manuell oder automatisch nachjustiert werden. Bei Kontaktlinsen- und Brillenträgern kann es dabei durch unkontrollierbare Reflexionen zu Schwierigkeiten kommen. Da kopfgestützte Augenbewegungskameras den berührungslosen Systemen an Genauigkeit insgesamt überlegen sind, werden sie in der physiologischen und psychologischen Forschung meist vorgezogen.

Abschließend werden die verschiedenen typischen Charakteristika des Auges, nach denen sich gängige Systeme richten, kurz erläutert. Bei den exotischen und an dieser Stelle nur zur Vollständigkeit erwähnten *Infrarot-Limbus- und Augenlidregistrierungen* wird die Grenzlinie zwischen Augapfel und Iris, der sogenannte Limbus, zur Registrierung horizontaler Bewegungen und das Augenlid zur Registrierung vertikaler Augenbewegungen (und Lidbewegungen) genutzt. Eine ausführliche Darstellung dieses Verfahren findet sich z.B. bei Carpenter (1988). Moderne *Cornea-Reflex-Methoden* und *Purkinje-Systeme* machen sich die Tatsache zu nutze, dass sich ein einfallender (infraroter) Lichtstrahl an verschiedenen Oberflächen des Auges (an Cornea und Linse) bricht, wodurch entsprechende Reflexionen, sogenannte Purkinje-Bilder (Abbildung 2.4 B) entstehen. Die räumliche Veränderung eines Bildes (des ersten Purkinjebildes) bei der Cornea-Reflex-Methode oder die Veränderung der Distanzen zweier Bilder (Purkinje-Bild 1 und 4 - Crane & Steel, 1978) bei Purkinje-Systemen geben Auskunft über die Rotation des Auges. Da Purkinje-Systeme eine ausreichend große Pupille voraussetzen, sind sie nur bei etwa 50% der Probanden einsetzbar (Galley, 2001), zudem wird ein Bissbrett benötigt. Bei der am häufigsten angewandten *Pupillenregistrierung* reflektiert die Netzhaut das ins Auge einfallende Infrarotlicht und die Pupille erscheint als heller Punkt (vergleichbar mit dem Rote-Augen-Effekt bei der Fotografie). Das System errechnet dann die Mitte dieses hellsten Punktes im Auge (Abbildung 2.4 B), verfolgt diese und kann so die Bewegung des Auges relativ zum Kopf erfassen (Gee & Cipolla, 1996). Andere Systeme errechnen anhand bestimmter Gradienten der Grenze von Regenbogenhaut (Iris) und Lederhaut (Sklera) das Zentrum der „dunklen“ Pupille und verfolgen dieses (Morimoto et al., 2000).

Eine Methoden-Kombination stellt die *Blickachsenmessung* dar. Hier werden Augenbewegungen über die Distanz zweier Messpunkte, z.B. einem Cornea-Reflex (üblicherweise dem vierten Purkinje-Bild) und dem Mittelpunkt der Pupille (Abbildung 2.4 B) errechnet. Bei Bewegungen des Kopfes verändert sich die relative Position der beiden Messpunkte hierbei nicht. Bei Bewegungen des Auges hingegen verschiebt sich der Cornea-Reflex gegenüber dem Pupillenmittelpunkt systematisch, so dass diese gegenüber Kopfbewegungen kaum anfällige Methode sich gut zur „berührungslosen“ Messung eignet.

Welches Verfahren zur Anwendung kommt, hängt von der jeweiligen Fragestellung, den finanziellen Mitteln und der zur Verfügung stehenden Zeit ab. So fällt beispielsweise das EOG bei Versuchen zum Lesen aus, die eine hochauflösende Ortstreue fordern (z.B. wenn später nachvollzogen werden soll, ob der Proband beim Lesen von „die da“ entweder „die“ oder „da“ fixiert hat). Sollen beim Lesen eines bestimmten Textes hingegen die mittleren Sakkadengeschwindigkeiten unabhängig vom Blickort ermittelt werden, ist ein EOG gegenüber den meisten videobasierten Verfahren zu bevorzugen.

2.4 Darstellung und psychologische Interpretation von Augenbewegungsdaten

Obwohl eine Vielzahl von Augenbewegungsparametern in unterschiedlicher Ausprägung und Zuverlässigkeit Aufschluss über kognitive Zustände geben (für einen Überblick siehe hierzu z.B. Galley, 2001), beschränkt sich die Darstellung in diesem Abschnitt aufgrund ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit auf Fixationen, Sakkaden und Lidschläge.

Zahlreiche Untersuchungen (z.B. Eriksen & Hoffman, 1973; Posner, 1980) stützen die Annahme, dass im allgemeinen eine Übereinstimmung zwischen dem *Fixationsort* und dem Zentrum der visuellen Aufmerksamkeit besteht, da die Aufmerksamkeit, gekoppelt an Sakkaden, das Auge zu seinem Ziel führt (für eine ausführliche Diskussion siehe Cave & Bichot, 1999). So kann durch die Provokation einer Blickbewegung in eine bestimmte Richtung, ein in dieser Richtung erscheinender Reiz schneller beantwortet werden, was für eine in Reizrichtung gelenkte Aufmerksamkeit spricht (Posner, 1980). Dass man etwas aus den Augenwinkeln beobachten kann, ohne es zu fixieren, zeigt jedoch, dass eine Übereinstimmung von Fixationsort und Aufmerksamkeit nicht zwingend notwendig ist. Auch beim Nachdenken ist die Aufmerksamkeit keinem Objekt in der Umgebung zugewandt (Posner et al., 1980; Reeves & Sperling, 1986), sondern nach „innen“ gerichtet (siehe auch Kahneman, 1973). Es ist also möglich, den Aufmerksamkeitsfokus ohne begleitende Augenbewegungen zu verlagern (verdeckte Aufmerksamkeit). Die Augen können jedoch nicht auf ein visuelles Ziel gerichtet werden, ohne dass parallel eine Aufmerksamkeitsverlagerung stattfindet (z.B. Hoffman & Subramaniam, 1995; Kowler et al., 1995; Deubel & Schneider, 1996).

Der Fixationsort, die Reihenfolge und Häufigkeit fixierter Objekte und vor allem die *Fixationsdauer* liefern wertvolle Informationen über Prozesse der visuellen Aufmerksamkeit und damit über kognitive Zustände. So zeigten bereits Buswell (1935) und Yarbus (1967), dass sich Blickmuster beim Betrachten von Bildern zwar inter- und intraindividuell unterscheiden,

bestimmten Bildelementen (z.B. den Augen bei Gesichtern, oder Menschen bei Gemälden) aber regelmäßig mehr Blicke, also visuelle Aufmerksamkeit, geschenkt wurde als anderen (siehe auch Jeannerod et al., 1968). Norton & Stark (1971) nutzten diese Erkenntnis erstmals, um idealisierte *Blickpfade* einzelner Personen zu erstellen. Abbildung 2.5 zeigt die Blickpfade einer klassischen Untersuchung von Yarbus (1967). Repins Gemälde „Der unerwartete Besucher“ wurde von Probanden unter unterschiedlichen Instruktionsbedingungen betrachtet: „Freies Betrachten“ (1), „Schätzen des sozialen Status der Personen“ (2), „Schätzen des Alters der Personen“ (3), „Vermuten, was die Personen vor der Ankunft des unerwarteten Besuchers taten“ (4), „Kleidungen der Personen merken“ (5), „Position der Personen und Objekte im Raum merken“ (6) und „Vermuten, wie lange der unerwartete Besucher von der Familie getrennt war“ (7). Es zeigte sich, dass sich die Blickmuster je nach Aufgabenstellung unterschieden, unterschiedliche Blickmuster also unterschiedliche kognitive Zustände oder Ziele widerspiegeln.

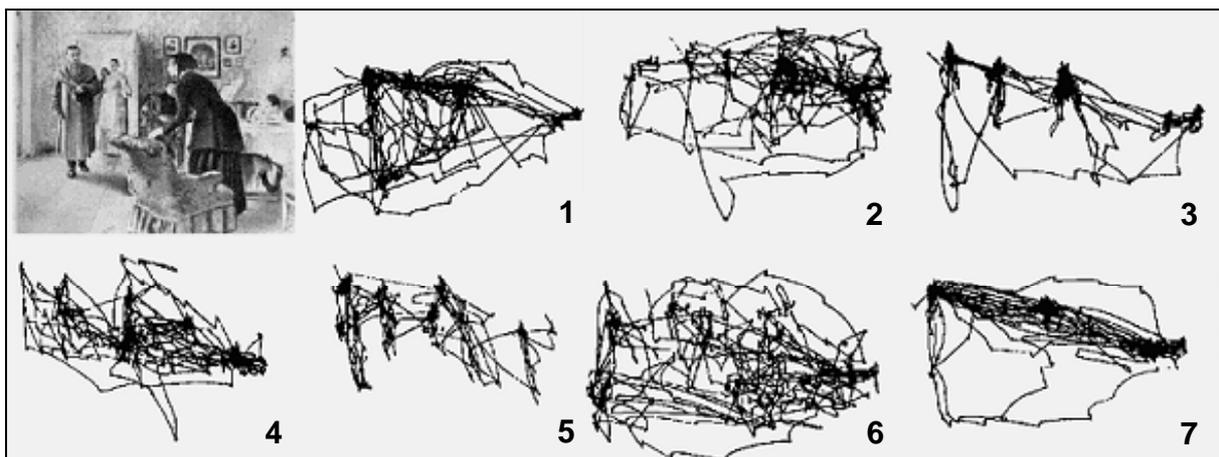


Abbildung 2.5. Auswirkung der Instruktion auf das Blickverhalten (aus Yarbus, 1967).

Derartige aufgaben- oder zustandsspezifische Blickmuster wurden vor allem in den 1990er Jahren beschrieben. So zeigen beispielsweise Kricketspieler regelmäßig spezifische Fixationsmuster, bei denen der Punkt des Ballaufpralls vor seinem Aufschlag genau fixiert wird (Land & McLeod, 2000). Ähnliche „vorausschauende“ Muster wurden beim Tischtennis (Land et al, 1997) und auch beim Spurwechsel oder Beobachten potentieller Gefahren im Straßenverkehr gefunden (Salvucci & Liu, 2002). Liu & Pentland (1997), Salvucci (2001) und Salvucci et al. (2002) entwickelten diesbezüglich stochastische Modelle, die es ermöglichen, anhand charakteristischer Blickmuster mit hoher Wahrscheinlichkeit zukünftiges Verhalten zu errechnen.

Da der Fixationsort in der Regel auch der Ort ist, der visuell verarbeitet wird, gilt die Dauer einer Fixation entsprechend als Maß für die Bearbeitungsdauer des fixierten Inhaltes. Fixationen haben eine Dauer von 100 ms bis 2000 ms mit einer Konzentration im Bereich von 200 ms bis 600 ms (Karsh & Breitenbach, 1983; Young & Sheena, 1975), wobei bei einer zusätzlichen Einbeziehung dynamischer Fixationen (bei bewegtem Stimulusmaterial) auch Perioden von mehreren Sekunden möglich sind. Die Häufigkeitsverteilung der Fixationsdauern kann auch bei identischem Mittelwert unterschiedlich sein. Im allgemeinen typisch ist eine rechtsschiefe Verteilung (Joos et al., 2003). Übliche durchschnittliche Fixationsdauern betragen nach Rayner (1998) beispielsweise etwa 225 ms beim Lesen, 330 ms bei der Bildwahrnehmung und 275 ms bei visuellen Suchaufgaben. Diese Werte lassen sich aber nicht ohne weiteres verallgemeinern, da sie unter anderem von der Schwierigkeit und der erforderlichen Genauigkeit der durchzuführenden Aufgabe abhängen (z.B. Rayner, 1998). So gaben Velichkovsky et al. (1997) Probanden die Aufgabe, schwarz-weiße Bilder mit unbekanntem Gesichtern auf der perzeptiven (mehr schwarz oder weiß?), der semantischen (Mann oder Frau?) oder auf der metakognitiven (sympathisch oder unsympathisch?) Ebene zu bearbeiten. Es fand sich ein Anstieg der Fixationsdauern entsprechend dieser Ebenen, d.h. die tiefere, aufmerksamere Verarbeitung bei den schwierigeren Aufgaben spiegelte sich in verlängerten Fixationen wieder. Auch einzelne, sogenannte „phasische“ Verlängerungen der Fixationsdauer, die bei einer alleinigen Analyse von Mittelwerten vernachlässigt werden, spiegeln Aufmerksamkeitseffekte wieder. So wurden z.B. verlängerte phasische Fixationen bei Bremsreaktionen (Unema et al., im Druck) oder der Gefahrenerkennung im Straßenverkehr (Velichkovsky et al., 2002) gefunden. Es sei an dieser Stelle zur eindeutigen Abgrenzung erwähnt, dass die Dauer einer Fixation im allgemeinen nicht vollständig der *Sakkadenlatenz* entspricht, da eine Fixation bereits stattfinden kann, bevor ein Reiz auftaucht, der eine Sakkade auslöst. Dennoch wirkt sich die Fixation unmittelbar auf die Sakkadenlatenz aus: Bevor sich die Aufmerksamkeit auf ein anderes Objekt verlagern kann, muß sie sich nach Posner (1995) vom Fixationsort lösen („attentional disengagement“). Bei einer längeren Fixation bindet sich der Betrachter an ein Objekt („engagement“). Bevor keine Loslösung stattfindet, wird keine Sakkade initiiert und mit der aktuellen Fixation auch die Sakkadenlatenz verlängert. Im oben erwähnten „Gap-Paradigma“ (siehe Abschnitt 2.2) beispielsweise hat der Loslösungsprozess bereits stattgefunden, was die kürzeren Sakkadenlatenzen von Express-Sakkaden erklärt. Weiterhin stellt auch die Größe des Bereichs, innerhalb dessen während einer Fixation Informationen aufgenommen und verarbeitet werden kann (funktionales Sehfeld – siehe auch Mackworth, 1965), einen Parameter dar, der Informationen über Aufmerksamkeitsprozesse liefert: Mit steigender Auf-

gabenanforderungen engt sich das funktionale Sehfeld ein (z.B. Rayner & Fischer, 1987; Pomplun et al., 2001).

Moderne bildverarbeitende Verfahren erlauben die Darstellung von objektbezogenen Fixationen inklusive ihrer Dauern. Abbildung 2.6 zeigt vier Arten der Darstellung des Fixationsverhaltens beim Betrachten eines Fotos: *Fixationspunkte*, deren Durchmesser mit der Dauer der Fixation steigt (A), wobei auch die Reihenfolge der Fixationen und die Flugbahnen der Sakkaden darstellbar sind; mit Hilfe von Clusteranalysen (nach Pillaramari et al., 1993) erstellbare *Gebiete des Interesses* (B); eine dreidimensionale graduelle Funktion über das betrachtete Bild, bei der ein höherer Gipfel einer höheren Aufmerksamkeitszuwendung entspricht (C), die als Filter genutzt werden kann, um sogenannte *Aufmerksamkeitslandschaften* (Velichkovsky et al., 1996) zu erzeugen. Mit Hilfe von Aufmerksamkeitslandschaften lassen sich subjektive Ansichten (D) von Szenen visualisieren, z.B. kann so die Wahrnehmung mehrdeutiger Bilder (Neckerwürfel, Bilder von M.C. Escher etc.) dargestellt werden (Pomplun et al., 1996).

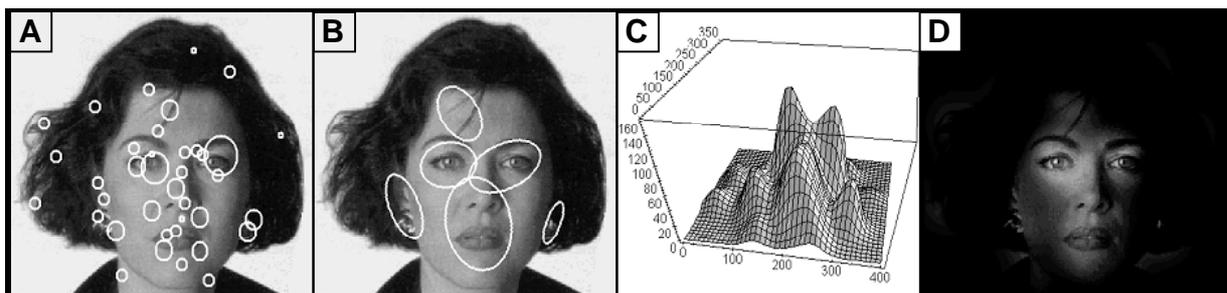


Abbildung 2.6. Verschiedene Arten der Darstellung der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung beim Betrachten eines Fotos der Schauspielerin Anja Kruse: Als Fixationspunkte (A), als Cluster von Fixationen (B), als Filter für „Aufmerksamkeitslandschaften“ (C) für eine „subjektives Ansicht“ (D) des Bildes (aus Velichkovsky et al., 1996).

Die visuelle Verarbeitung findet wahrscheinlich auf mehreren (siehe Rensink, 2000b, 2002; Velichkovsky, 1982, 2002), mindestens jedoch auf zwei Aufmerksamkeitsebenen (z.B. Trevarthen, 1968) statt. Beim Betrachten einer neuen visuellen Szene werden zuerst auf einer ambienten Ebene Objekte in der Umwelt lokalisiert. Die Szene wird grob und schnell „abgetastet“, d.h. im gesamten visuellen Feld werden parallel etwa ein Dutzend einfache Objektmerkmale wie Farbe, Orientierung und Bewegung erfasst - es entsteht der subjektive Eindruck „überall irgendetwas zu sehen“. Auf einer zweiten, durch serielle Verarbeitung gekennzeichneten, fokalen Ebene, wird die Aufmerksamkeit dann gezielt auf einzelne Objekte gerichtet, die jeweiligen Merkmale werden ganzheitlich organisiert und das Objekt letztlich identifiziert.

Schon Buswell (1935) berichtete in seinen Pionierarbeiten von längeren Fixationsdauern bei zunehmender Betrachtungsdauer und brachte dies mit zwei qualitativ unterschiedlichen Phasen der visuellen Verarbeitung in Verbindung. Weitere Unterscheidungen eines dualen visuellen Systems finden sich bei Neisser (1967) und Hoffman (1999), die die entsprechende visuelle Verarbeitung in eine präattentive und eine attentive Phase unterteilen. Eine neuroanatomische Unterscheidung der visuellen Verarbeitung in zwei parallele Sehpfade wurde bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts von Ramon y Cajal (1909) getroffen. Er trennte subkortikales Sehen, das er ausschließlich visuell motorischen Funktionen zuordnete, von einem kortikalen Sehpfad, dem er höhere perzeptuelle Aufgaben zuteilte. 1969 wurde das Konzept von Schneider erneut aufgegriffen, der analog zwei anatomisch unterscheidbare visuelle Systeme postulierte. Gestützt auf experimentelle Untersuchungen an Goldhamstern nahm er an, dass ein subkortikaler Sehpfad von der Retina hin zum Superior Colliculus Orientierungsreaktionen hervorruft und ein kortikaler Sehpfad von der Retina über den Corpus Geniculatum Laterale zum primären visuellen Cortex, zur Diskriminierung von Mustern verantwortlich ist (siehe auch Abbildung 2.3). Nach Entfernung des Superior Colliculus waren die Hamster nicht mehr in der Lage, Objekte zu lokalisieren, zur Musterdiskriminierung hingegen waren sie weiterhin fähig. Eine Entfernung von Arealen des visuellen Cortex führte wiederum zu einer unterbrochenen Musterdiskriminierung bei intakter Lokalisation von Objekten. Ähnliche Ergebnisse brachte Trevarthens Studie (1968) mit Affen hervor. Ungerleider & Mishkin (1982) bezeichneten die beiden Subsysteme der visuellen Wahrnehmung als „Wo-System“ zur Lokalisierung und als „Was-System“ zur Identifizierung von Objekten.

Um ein Kriterium zur Trennung von ambienter (Wo) und fokaler (Was) Verarbeitung zu finden, registrierten wir das Blickverhalten von Probanden und analysierten das *Verhältnis von Fixationsdauern und Sakkadenamplituden* (Dornhöfer et al., 2000; Pannasch et al., 2001b). Bei der Betrachtung von Gemälden zeigte sich diesbezüglich, dass kurze, mit oberflächlicher Verarbeitung einhergehende Fixationen (90 ms bis 140 ms) von Sakkaden gefolgt werden, deren Amplituden größer als der Radius des parafovealen Bereichs ($>4^\circ$) sind. Diese Sakkaden beziehen sich daher nicht auf eine detaillierte fokale Repräsentation eines Objektes. Sie dienen, in Verbindung mit den kurzen Fixationen, der ambienten Verarbeitung. An Fixationen mit einer Dauer über 140 ms schließen sich Sakkaden innerhalb der parafovealen Region an - dieses Verhältnis führt zu fokaler, aufmerksamer Verarbeitung. Zur graphischen Darstellung des jeweiligen Aufmerksamkeitszustandes eines Probanden entwickelten wir eine Filtertechnik zur Erstellung von Aufmerksamkeitslandschaften (Dornhöfer et al., 2000). In Abbildung 2.7 wird anhand experimenteller Daten die ambiente (B) und fokale (C) Sichtweise eines Ge-

mälde (A) visualisiert. In einer dynamischen Umgebung (Fahrsimulation - Velichkovsky et al., 2002) verschoben sich die Segmente der ambienten und fokalen Verarbeitung in Richtung der längeren Fixationsdauern. Ambiente Fixationen mit ihren langen Sakkadenamplituden zeigten sich dort im Bereich von 90 ms bis 280 ms und die fokalen Fixationen ab etwa 280 ms. Der Grund für diese Verschiebung liegt in der Transformation statischer in längere dynamische Fixationen.



Abbildung 2.7. „Die verkehrte Welt“ von Jan Steen (1663): (A) Original, (B) ambiante Sichtweise, (C) fokale Sichtweise (aus Velichkovsky, 2002).

Auch *Lidschlagparameter* werden von kognitiven Prozessen beeinflusst. Bereits 1927 berichteten Ponder & Kennedy über interindividuelle Schwankungen der Lidschlagrate und brachten diese erstmals mit kognitiven und emotionalen Beanspruchungen in Verbindung. Nach Stern et al. (1984) liegt die individuell variierende Spontanrate zwischen 5 und 60 Lidschlägen pro Minute und hängt vor allem von der durchzuführenden Aufgabe und dem Aufmerksamkeitszustand (siehe auch Holland & Tarlow, 1972) ab. Da Lidschläge die visuelle Informationsaufnahme bis zu 200 ms (Stern, 1984) unterbrechen (zur visuellen Stabilität während Lidschlägen siehe auch Hari et al., 1994), werden sie mit zunehmender visueller Anforderung einer Aufgabe entsprechend gehemmt und erst dann ausgeführt, wenn der Prozess der Informationsaufnahme am wenigsten gestört wird. So führt z.B. Lesen bei vielen Probanden mühelos zu einer Halbierung der Rate, und die „verzögerten“ Lidschläge werden bevorzugt während einer größeren Sakkade oder eines Zeilensprungs nachgeholt (Reitter, 2000). Beim Autofahren leistet sich der Fahrer eher dann einen Lidschlag, wenn Informationsverarbeitungsprozesse abgeschlossen sind, z.B. wenn der Blick in den Rückspiegel oder auf den Tacho beendet ist (Galley, 1993). Weiterhin gelten Lidschlagrate und –dauer als Indikatoren für den Müdigkeits- und Aufmerksamkeitszustand (z.B. Stern et al., 1994, Galley, 2001). Tietze & Hargutt (2001) zeigten diesbezüglich in einer Fahrsimulationsstudie, dass Probanden mit zunehmender Müdigkeit häufiger und langsamer Lidschläge machten, was sich negativ auf die Güte des Fahrens auswirkte. Diese Befunde unterstützten sie zusätzlich mit EEG-Daten.

3 Veränderungenblindheit

3.1 Formen und Paradigmen zur Erzeugung von Veränderungsblindheit

Beim Betrachten natürlicher Szenen wird weit weniger visuelle Information explizit wahrgenommen als es der subjektive Eindruck vermittelt - wir sehen weniger als wir glauben (z.B. Dennett, 1991; Wolfe, 1999a). Im menschlichen Gehirn wird zwar eine interne Repräsentation der Außenwelt gebildet, die letztendlich den Eindruck einer dreidimensionalen, farbigen und komplexen Welt vermittelt. Diese mentale Repräsentation stellt jedoch aufgrund des begrenzten visuellen Arbeitsgedächtnisses (siehe hierzu z.B. Luck & Vogel, 1997; Saiki, 2002) und individuellen Auswirkungen des Kontextes auf die Wahrnehmung (Schemata – z.B. Bartlett, 1932; Neisser, 1976) keinesfalls ein detailgetreues Abbild der Umgebung dar. Beispielsweise identifizierten nur wenige Probanden die korrekte Zeichnung eines höchstvertrauten und oft betrachteten Geldstücks (einer Penny-Münze) aus einer Reihe sich ähnelnder Zeichnungen (Nickerson & Adams, 1979). Entsprechend, jedoch mit dramatischeren Folgen, erwiesen sich Augenzeugenberichte in kriminologischen Untersuchungen oft als ungenau oder falsch und beeinflussbar (z.B. Loftus, 1979). Allein in den USA werden nach Schätzungen von Loftus & Ketcham (1991) jährlich 10.000 Unschuldige aufgrund falscher Augenzeugenberichte verurteilt.



Abbildung 3.1. Worin unterscheiden sich die beiden Bilder A und B?

Das Defizit an Detailgenauigkeit unserer visuellen Wahrnehmung führt auch zu einer erheblichen Einschränkung in der wichtigen Fähigkeit, Veränderungen wahrzunehmen (z.B. im Straßenverkehr). Dies zeigt sich eindrucksvoll in Studien zur sogenannten Veränderungsblindheit. In derartigen, seit den 1990er Jahren stark verbreiteten Untersuchungen werden Veränderungen einer Szene meist nicht bemerkt, auch wenn aktiv danach gesucht wird: Die Probanden sind (unter bestimmten Umständen - s.u.) blind für die Veränderung. Abbildung 3.1 illustriert

das Phänomen anhand einer Verkehrssituation, wenngleich es sich genaugenommen nicht um klassische Veränderungsblindheit (sondern Unterschiedsblindheit – s.u.) handelt. Dennoch wird es für die Mehrheit der Leser lange dauern, einen oder mehrere Unterschiede zwischen den beiden Bildern zu finden (es sind insgesamt neun).

Klassische Veränderungsblindheit (*Change Blindness* – Rensink et al., 1997) tritt dann auf, wenn das durch eine Veränderung hervorgerufene Bewegungssignal durch eine globale, also die gesamte Sicht betreffende, Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung genau zum Zeitpunkt der Veränderung, „verdeckt“ wird. Ohne dieses „alarmierende“ Bewegungssignal kann die visuelle Aufmerksamkeit nicht zum Ort der Veränderung gelenkt werden. Zwei natürliche globale Unterbrechungen der visuellen Wahrnehmung sind *Sakkaden*, während derer auf Grund der sakkadischen Unterdrückung (siehe Abschnitt 2.2) praktisch keine Informationsaufnahme stattfindet und *Lidschläge*, die das Auge für kurze Zeit physikalisch bedecken. Bereits in frühen Untersuchungen zur Integration visueller Information zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fixationen zeigte sich, dass die retinale, während einer Sakkade stattgefundenene, Verschiebung kleiner einfacher Reize (z.B. Punkte) häufig nicht entdeckt wurde (Ditchburn, 1955; Wallach & Lewis, 1966). Bridgeman et al. (1975) fanden ähnliche Ergebnisse bei Verschiebungen großflächiger Reizmuster. McConkie & Zola (1979) sowie O'Regan (1981) veränderten und verschoben sogar Buchstaben und Wörter unbemerkt während Sakkaden. Grimes (1996) zeigte als erster, dass sakkadenkontingente Veränderungen auch in einer „natürlichen“ Szene oft nicht entdeckt werden. Probanden betrachteten hierzu, für einen angeblichen späteren Gedächtnistest, auf einem Computermonitor dargebotene Fotos alltäglicher Situationen und sollten mit einem Knopfdruck auf mögliche Veränderungen reagieren. Während der Betrachtung wurden einzelne Details während Sakkaden (mit Hilfe von Augenbewegungsregistrierung) verändert, z.B. wurden die Köpfe zweier Personen ausgetauscht oder ein Gebäude vergrößerte sich um 25%. Die Mehrheit der Veränderungen (67%), die ein Viertel des Bildes einnehmen konnten und sich mitunter im Zentrum des Blickfeldes befanden, wurde von den Probanden nicht entdeckt. Dieselben Veränderungen wurden jedoch sofort entdeckt, wenn sie während einer Kontrollbedingung (in Fixationsphasen, in denen das Bewegungssignal nicht verdeckt wurde) dargeboten wurden. Blackmore et al. (1995) gelang es mit einem künstlicheren aber eleganten Paradigma, Sakkaden durch schnelle Verschiebungen kompletter alltäglicher Bilder (schwarz-weiße Fotos) zu provozieren und während dieser Verschiebung (und somit während einer Sakkade) Details des Bildes zu verändern. Verglichen mit einer Kontrollbedingung, in der sich das Bild nicht verschob, fanden auch sie eine schlechtere Entdeckungsleistung. Ein Sonderfall von sakkadenbedingter Verän-

derungsblindheit zeigt sich in Untersuchungen zur *Unterschiedsblindheit*, in denen Probanden - wie im oben illustrierten Beispiel (Abbildung 3.1) - instruiert werden, nach Unterschieden in zwei parallel dargebotenen natürlichen Bildern zu suchen (z.B. Gur & Hilgard, 1975; Shore & Klein, 2000). Die Sakkaden, die gemacht werden, um die beiden Bilder zu vergleichen, reichen aus, um die Repräsentation der Szene unbewusst zu unterbrechen und so die Entdeckung der Unterschiede erheblich zu erschweren oder zu verhindern. Da sich Veränderungen im Gegensatz zu Unterschieden dadurch auszeichnen, dass sie nicht parallel, sondern über die Zeit stattfinden (Rensink, 2002), sollten derartige Untersuchungen, obwohl sie zu vergleichbaren Effekten führen, qualitativ von denen zur klassischen Veränderungsblindheit abgegrenzt werden. Mit Grimes' (1996) Ergebnissen vergleichbare Effekte der Veränderungsblindheit fanden O'Regan et al. (2000) in einer Untersuchung, in der Veränderungen (ebenfalls Fotos alltäglicher Situationen) experimentell während Lidschlägen dargeboten wurden. Hier wurden sogar bei direkter Fixierung des Ortes der Veränderung 40% der Veränderungen nicht entdeckt - sie wurden zwar angeschaut, aber nicht „gesehen“. Filmemacher, denen das Phänomen der augenbewegungskontingenten Veränderungsblindheit schon länger bekannt ist, wenden dieses Wissen in versierten Schnitttechniken an (z.B. Dmytryk, 1984; Murch, 2001). Sie provozieren z.B. durch optische Reize lange Sakkaden oder rufen durch Geräusche Lidschläge hervor (Schreckreaktion – z.B. Blumenthal & Goode, 1991), um so gezielt „unbemerkt“ zu schneiden.

Mit geringerem technischem Aufwand lassen sich augenbewegungskontingente globale Unterbrechungen der visuellen Wahrnehmung simulieren. Künstliche Verdeckungen der gesamten Darbietungsfläche, sogenannte *Blanks*, eignen sich unter anderem gut zur Simulation von Lidschlägen. Die Blanks, z.B. in Form einer weißen Fläche, werden dazu zwischen einem Ausgangsbild und dem veränderten Bild kurz dargeboten. Man unterscheidet hierbei zwischen dem „*One-Shot-Paradigma*“ und dem „*Flicker-Paradigma*“ (Abbildung 3.2), wobei sich beide Paradigmen auch zur Untersuchung von Veränderungsblindheit mit anderen Unterbrechungsformen eignen. Beim One-Shot-Paradigma wird das Ausgangsbild und das veränderte Bild dem Probanden nur einmal dargeboten, bevor er rückmelden soll, ob er eine Veränderung entdeckt hat (z.B. Blackmore et al., 1995; Mondy & Coltheart, 2000; Wright et al., 2000). Diese Technik minimiert den störenden Einfluss von Augenbewegungen und Effekten des Langzeitgedächtnisses. Auch können bestimmte Richtungen einer Veränderung, z.B. das Wechseln der Farbe von Blau zu Rot oder das Verschwinden eines Gegenstandes, geprüft werden. Beim weniger natürlichen Flicker-Paradigma wird das Ausgangsbild und das veränderte Bild wiederholt abwechselnd dargeboten (z.B. Pashler, 1988; Rensink et al., 1997). Da-

durch wird eine ausreichende Betrachtungszeit gewährleistet, so dass eine Nichterkennung der Veränderung aufgrund unzureichender Gedächtnisrepräsentation ausgeschlossen werden kann.

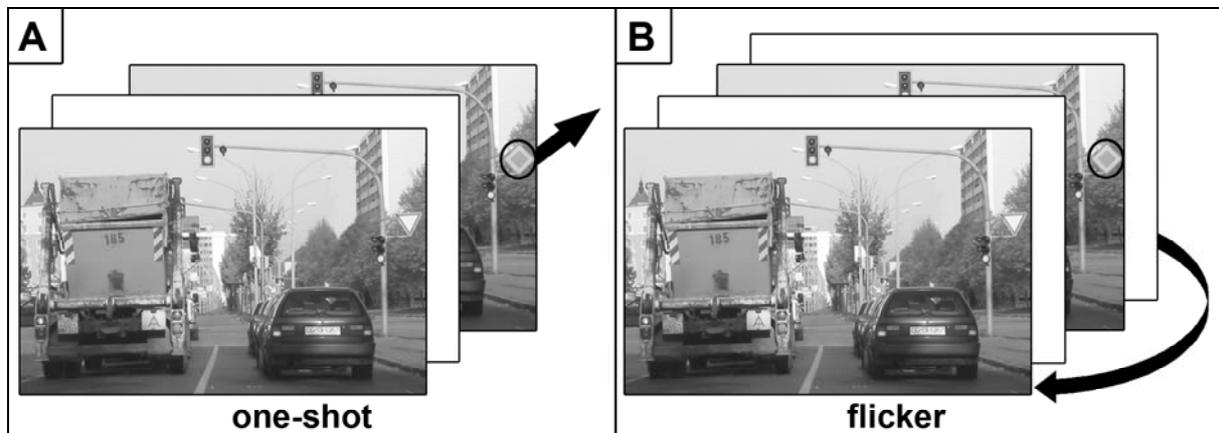


Abbildung 3.2. Zwei Paradigmen zur experimentellen Erzeugung klassischer Veränderungsblindheit: (A) One-Shot-Paradigma, (B) Flicker-Paradigma.

Blackmore (1995) und Rensink et al. (1997) zeigten, dass sich mit beiden Paradigmen Veränderungsblindheit bei natürlichen Bildern erzeugen lässt. Wallis & Bühlhoff (2000) sowie Shinoda et al. (2001) erzielten entsprechende Ergebnisse bei dynamischem Stimulusmaterial.

Eine weitere künstliche globale Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung, die zu Veränderungsblindheit führt, stellt der Schnitt beim Film dar, der in der Regel einen Perspektivwechsel des Zuschauers markiert und somit Sakkaden (und/oder Kopfbewegungen) simuliert. So zeigten Levin & Simons (1997), dass 89 von 90 kleinen Veränderungen, die während eines Schnitts stattfanden (z.B. das Austauschen einer Getränkedose gegen eine Schachtel oder das Verschwinden eines Halstuches) nicht entdeckt wurden. In einem weiteren Versuchsteil dieser Studie entdeckten nur 33% aller Probanden, dass der Hauptdarsteller ausgetauscht wurde. Die Blindheit für diese sogenannten Anschlussfehler ist Filmemachern auch lange bekannt (z.B. Kuleshov, 1920/1974; Dmytryk, 1984), so dass sogar bei großen Hollywood-Produktionen aus Kostengründen häufig davon abgesehen wird, entsprechende Szenen neu zu drehen. In einem der mehreren hundert Anschlussfehler der „Star Wars“-Saga beispielsweise, tauschen zwei Personen während eines Kampfes plötzlich ungewollt ihre unterschiedlich farbigen Lichtschwerter. Bereits 1967 demonstrierte Kunstfilmer Jean Luc Godard in seinem Film „Weekend“ ein Beispiel für klassische Veränderungsblindheit: Kurz vor und schließlich zwischen den beiden betroffenen Einstellungen kündigt er einen Anschlussfehler auf eingeblenden Texttafeln an (Abbildung 3.3).



Abbildung 3.3. Godards Demonstration von Veränderungsblindheit: Eine tote Frau dreht sich im rechten Arm eines Mannes um 180° (Copyright: Grove Press, 1967).

Um Veränderungsblindheit hervorzuheben, muss die Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung nicht zwingend globaler Natur sein. So zeigten Rich & Gilliam (2000) sowie Saiki (2002) anhand künstlichem Stimulusmaterials, dass es ausreicht, wenn nur das sich verändernde Objekt kurz physikalisch verdeckt wird. Bereits zuvor zeigten Simons & Levin (1998), dass sich dieser Sachverhalt auch in die reale Welt übertragen lässt. In ihrer Studie fragte ein Versuchsleiter Passanten nach dem Weg. Jeweils mitten im Gespräch trugen zwei andere eingeweihte Personen eine Tür zwischen Versuchsleiter und Befragtem hindurch, so dass der Versuchsleiter für kurze Zeit verdeckt wurde. Während dieser Zeit wurde er durch einen zweiten Versuchsleiter ersetzt. Nur die Hälfte aller Befragten bemerkte dies, obwohl sich die ausgetauschte Person deutlich in Kleidung, Größe, Frisur und Stimme unterschied.

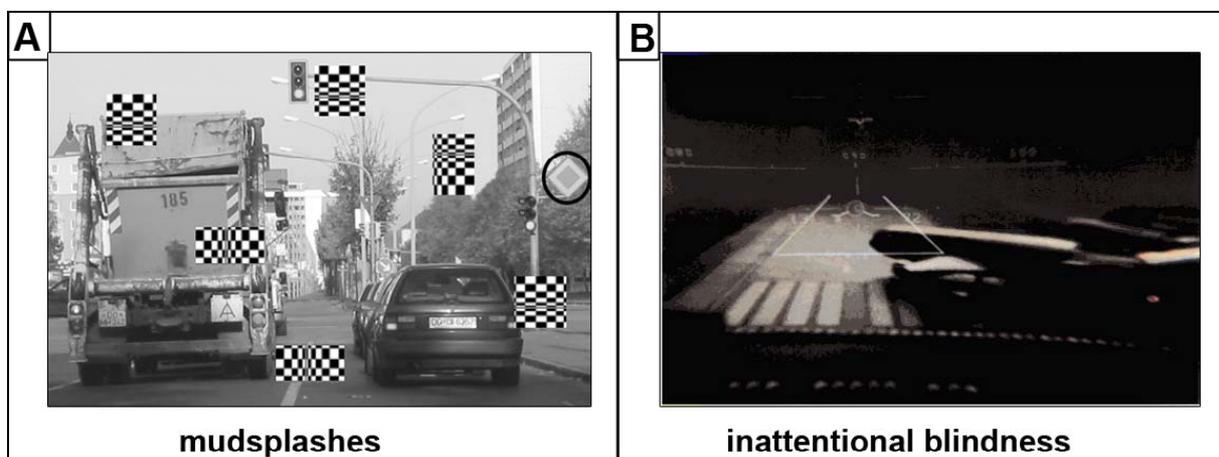


Abbildung 3.4. Ablenkungsbedingte Veränderungsblindheit ohne Verdeckung der Veränderung: (A) Ablenkung durch Mudsplashes, (B) Ablenkung durch Head Up Display (aus O'Regan, & Noë, 2001).

Letztlich zeigte eine Reihe von Studien, dass Veränderungsblindheit sogar auftreten kann, wenn die Veränderung nicht verdeckt wird. O'Regan et al. (1999) boten bei natürlichem Material (Fotos alltäglicher Situationen) gleichzeitig mit der Veränderung auftauchende Distraktoren (sogenannte *Mudsplashes* – siehe Abbildung 3.4 A) dar und erschwerten so die Entde-

ckung der „richtigen“ Veränderung. Im Vergleich mit einer Blank-Bedingung fiel dieser Effekt jedoch etwas geringer aus. Turatto et al. (2003) kamen zu vergleichbaren Ergebnissen, indem sie zwischen dem Ausgangsbild und dem veränderten Bild zur globalen Ablenkung erneut das Ausgangsbild mit negativen Kontrasten darboten.

Das Unvermögen unverdeckte Veränderungen aus Mangel an Aufmerksamkeitszuwendung wahrzunehmen, wird allgemein als „*Inattentional Blindness*“ bezeichnet (Mack & Rock, 1998), wenngleich Wolfe (1999b) davon ausgeht, dass Veränderungen durchaus wahrgenommen werden können, aber nicht erinnert werden und das Phänomen daher als „*Inattentional Amnesia*“ bezeichnet. Den bedeutendsten Beitrag leistete diesbezüglich bereits Neisser (1979) durch die Einführung des Paradigmas des selektiven Sehens, einer Analogie zum Paradigma des dichotischen Hörens (Cherry, 1953) aus der Forschung zur selektiven Aufmerksamkeit. Er bot Probanden überlappende Videos von zwei basketballspielenden Gruppen dar. Wenn die Probanden instruiert wurden, nur auf Pässe einer der beiden Mannschaften zu achten, während sie die Pässe der anderen ignorieren sollten, wurde ein zusätzliches irrelevantes Ereignis (eine Frau mit Regenschirm, die das Bild von rechts nach links durchquerte) oft nicht wahrgenommen. Ähnliche und zugleich alarmierende Ergebnisse fand Haines (1991) bei äußerst relevanten Ereignissen: Professionelle Piloten wurden instruiert, in einem Flugsimulator unter schlechten Sichtbedingungen mit Hilfe eines „Head Up Displays“ (zwei in das Sichtfeld des Piloten projizierte Balken, die den genauen Abstand des Flugzeugs zum Boden anzeigen - Abbildung 3.4 B) zu landen. Zwei der elf untersuchten Piloten nahmen ein großes Verkehrsflugzeug, das deutlich sichtbar und unmittelbar vor Ihnen quer auf der Landebahn stand, nicht wahr, acht sahen das Flugzeug im Schnitt erst 4 s nachdem es aufgetaucht war und nur einer reagierte sofort. Einer der beiden „blinden“ Piloten soll, schockiert von seinem eigenen Versagen, unmittelbar nach dem Versuch den Dienst quittiert haben (Albers, 2001). Versierten Zauberkünstlern, Illusionisten oder Filmemachern gelingt es seit Jahrhunderten scheinbar mühelos ein derartiges Versagen kollektiv zu provozieren (siehe hierzu auch Clark, 2002). In einer berühmt-berüchtigten Szene des Films „Ein andalusischer Hund“ des Jahres 1929 lenkte Luis Buñuel die gesamte Aufmerksamkeit des Zuschauers auf einen in Nahaufnahme gezeigten horizontalen Rasiermesserschnitt durch das Auge einer jungen Frau. Dass es sich in Wahrheit um das Auge (und Teile des Kopfes) eines Schweins handelte, bemerkte keiner der schockierten Zuschauer (für Abbildungen und eine ausführliche Erörterung der Sequenz siehe Messaris, 1994). Inattentional Blindness kann auch durch auditive Ablenkung (z.B. durch Telefonieren beim Autofahren – z.B. Alm & Nilsson, 1995) verursacht werden und zusammen mit klassischer Veränderungsblindheit auftreten. So zeigten Richard et al. (2002), dass

sich Effekte klassischer Veränderungsblindheit bei natürlichem Material (Fotos von Verkehrssituationen) durch eine zusätzliche auditive Aufgabe verstärken.

In der artverwandten klassischen Maskierungsforschung an überwiegend künstlichem Material zeigte sich, dass Objekte, die deutlich sichtbar sind, durch die störende Wirkung eines zeitlich vorausgehenden oder folgenden Reizes schlechter oder gar nicht entdeckt werden (für eine ausführliche Erörterung der klassischen und neueren Maskierungseffekte siehe Breitmeyer, 1984). Der vielversprechendste Ansatz, und Inattentional Blindness am ähnlichsten, stammt jedoch aus der neueren Maskierungsforschung. Beim sogenannten „*Attentional Blink*“ (Raymond et al., 1992) wird dem Probanden schnell eine Folge von einzelnen aufeinanderfolgenden Zeichen dargeboten (etwa acht Zeichen pro Sekunde) - z.B. P-F-V-X-J-5-F-K. Die Probanden können diese Folge in der Regel gut lesen und bei entsprechender Instruktion erfolgreich auf die Zahl 5 reagieren. Sollen sie aber zusätzlich auf den Buchstaben X achten, gelingt es ihnen zwar auf das X (Reiz 1) zu reagieren, die 5 (Reiz 2) wird jedoch oft nicht entdeckt. Die Aufmerksamkeit, die auf Reiz 1 gerichtet wird, erschwert es offenbar auf Reize, die in den folgenden 500 ms auftauchen, zu reagieren. Ähnlich wie bei einem Lid-schlag kann für kurze Zeit keine Information bewusst aufgenommen werden und Reize, vermutlich auch Veränderungsreize, werden nicht bemerkt. Der Effekt zeigt sich auch, wenn es sich bei Reiz 1 und 2 um Worte handelt, unabhängig davon, ob deren Darbietung visueller oder auditiver Natur ist (Joseph et al., 1997). Kanwisher (1987) zeigte darüber hinaus mit dem Phänomen der Wiederholungsblindheit (*Repetition Blindness*), dass visuell ähnliche, schnell hintereinander dargebotene Reize wie Buchstaben, Worte, Symbole oder Bilder schlechter entdeckt werden, wenn sie zum zweiten Mal in identischer Form dargeboten werden. So wird z.B. das zweite Wort „Sport“ in dem Satz „, Sie wollten Sport machen, aber Sport war nicht erlaubt“ seltener entdeckt als in dem Satz „, Sie wollten Aerobic machen, aber Sport war nicht erlaubt“.

Einen Sonderfall von unverdeckter Veränderungsblindheit, sogar ohne jegliche Form von Ablenkung, stellen *graduelle Veränderungen* dar. Diesbezüglich zeigten Simons et al. (2000), dass bei Veränderungen, die sehr langsam in natürlichen Bildern (Fotos alltäglicher Situationen) ein- bzw. ausgeblendet werden (12 s), das Bewegungssignal zu langsam ist, um die visuelle Aufmerksamkeit an den Ort der Veränderung zu lenken. Sogar in der verdeckten (statischen) Kontrollbedingung wurden mehr Veränderungen entdeckt.

Abschließend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass viele der hier im Zusammenhang mit Veränderungsblindheit dargestellten Untersuchungen genaugenommen nur Aussagen zur

Veränderungsentdeckung machen, da Kontrollbedingungen, in denen die Veränderung unverdeckt oder ungestört dargeboten wird, fehlen und so das Ausmaß an Veränderungsblindheit unklar bleibt.

3.2 Faktoren, die sich auf Veränderungsblindheit auswirken

Zahlreiche Faktoren wirken sich auf die Entdeckung von Veränderungen und somit auf das Phänomen der Veränderungsblindheit aus. Im Folgenden werden daher die wichtigsten dieser Faktoren erläutert.

Hinsichtlich der *Instruktion* unterscheidet man prinzipiell zwischen Ansätzen, die entweder eine „*absichtliche*“ oder eine „*beiläufige*“ Entdeckung provozieren (Simons, 2000). Beim stark verbreiteten absichtlichen Ansatz wissen die Probanden, dass Veränderungen auftauchen, und ihre einzige Aufgabe besteht darin, aufmerksam nach diesen zu suchen (z.B. Pashler, 1988; Wright et al., 2000). Eine abgeschwächte Variante stellen Ansätze zur geteilten Aufmerksamkeit dar, in denen eine andere Hauptaufgabe, z.B. das Merken des Bildinhaltes für eine vermeintliche spätere Gedächtnisaufgabe, gestellt wird und zusätzlich auf Veränderungen reagiert werden soll (z.B. Grimes, 1996). Beim beiläufigen Ansatz hingegen betrachten die Probanden, in der Regel unter Bearbeitung einer unabhängigen Hauptaufgabe, eine Szene ohne zu wissen, dass sich etwas verändern kann (z.B. Levin & Simons, 1997, Shinoda et al., 2001, Triesch et al., 2003) und werden anschließend befragt, ob ihnen Veränderungen aufgefallen sind. So berichten Shinoda et al. (2001), dass das Austauschen eines Parkverbotschildes durch ein Stoppschild während eines Blanks von Probanden äußerst selten entdeckt wird, wenn sie ein vorausfahrendes Fahrzeug unter Einhaltung einer konstanten Geschwindigkeit verfolgen sollen. Das Ausmaß an Veränderungsblindheit ist beim beiläufigen Ansatz und bei Aufgaben mit geteilter Aufmerksamkeit im Allgemeinen höher als bei absichtlichen Entdeckungsaufgaben (Rensink, 2002) - nicht zuletzt weil die klassische Veränderungsblindheit durch die Konzentration auf die Hauptaufgabe (Inattentional Blindness) zusätzlich verstärkt wird. Dies bestätigen auch Wallis & Bühlhoff (2000) in einem Fahrsimulatorversuch, in dem Probanden, die selbst den Simulator steuerten, Veränderungen auf der Straße schlechter entdeckten als Beifahrer, die sich nicht zusätzlich auf das Lenken konzentrieren mussten. Levin et al. (2002) berichten, dass sich das Vorwissen über Veränderungsblindheit nicht auf die Entdeckungsleistung auswirkt. Sechs von neun Probanden entdeckten Veränderungen in Filmen nicht, obwohl ihnen das Phänomen bekannt war.

Weiterhin muss die durch die Instruktion vermittelte *Aufgabe* bezüglich der *Genauigkeit der Entdeckung* differenziert werden. So kann eine explizite Veränderung entdeckt, lokalisiert oder identifiziert werden. Die verbreitetste Aufgabe bei Untersuchungen zur Veränderungsblindheit stellt die einfache *Entdeckung* dar. Hier werden die Probanden ohne weitere Einschränkung instruiert, auf Veränderungen in einer visuellen Szene zu reagieren (z.B. Grimes, 1996; Austen & Enns, 2000b; Scott-Brown et al., 2000). Bei Aufgaben zur *Lokalisation* sollen die Probanden nur reagieren, wenn ihnen auch der Ort der Veränderung bekannt ist (z.B. Scott-Brown & Orbach, 1998; Fernandez-Duque & Thornton, 2000; Smilek et al., 2000). Die komplexeste Aufgabe ist schließlich die *Identifikation* des sich verändernden Objektes (Wilken, 1999; Mondy & Coltheart, 2000, Thornton & Fernandez-Duque, 2002; Rutkowski et al., 2003). Mondy & Coltheart (2000) zeigten, dass die Identifikation von Veränderungen, entsprechend der in Abschnitt 2.4 dargestellten Ebenen der visuellen Verarbeitung, schwieriger ist als die einfache Entdeckung. Hierzu boten sie Probanden Veränderungen in Fotografien dar, auf die sie bei Entdeckung mit einem Knopfdruck reagieren sollten. Bei erfolgreicher Entdeckung wurden sie zusätzlich gebeten, die Veränderung ausführlich zu beschreiben, also zu identifizieren. Veränderungen wurden unabhängig von ihrer Art (Farbe, Ort, Auftauchen, Verschwinden) seltener identifiziert als „nur“ entdeckt. Entsprechend fanden Rutkowski et al. (2003) bei veränderten Buchstaben schlechtere Leistungen bei der Identifikation. Vergleichbare Unterschiede fanden auch Fernandez-Duque & Thornton (2000) bei künstlichem Stimulusmaterial (Rechtecke) durch Variation des Entscheidungskriteriums: 45% der Veränderungen wurden „bemerkt“ (liberales Entscheidungskriterium), nur 29% wurden identifiziert (konservatives Entscheidungskriterium). In einer Nachfolgeuntersuchung zeigten Thornton & Fernandez-Duque (2002) darüber hinaus, dass Veränderungen seltener identifiziert als lokalisiert werden. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Begriff „Entdeckung“ zwar hinsichtlich der Genauigkeit der Entdeckung am schlechtesten trennt (von einer vagen Vermutung bis hin zur Identifikation ist alles möglich), Experimente zur einfachen Entdeckung aber gerade aus diesem Grund ein unkomplizierteres, vergleichbar natürliches Versuchsdesign ermöglichen.

Auch *Erfahrung*, *Lernen* und *Alter* wirken sich auf die Entdeckung von Veränderungen aus. So zeigten Werner & Thies (2000), dass Football-Experten Veränderungen in Bildern, die entsprechende Spielszenen darstellen, weitaus häufiger entdeckten als Laien. Reingold et al. (2001) fanden vergleichbare Expertise-Vorteile bei Schachspielern (siehe auch de Groot, 1965; Chase & Simon, 1973). Schachmeister entdeckten Veränderungen in sinnvollen und zufälligen Schachkonstellationen deutlich besser als Spieler auf mittlerem Niveau oder Anfänger. Bei sinnvollen Konstellationen zeigte sich zudem ein Expertenvorteil hinsichtlich der

visuellen Spannweite, also des Bereichs des Sehfeldes, indem Informationen innerhalb einer Fixation aufgenommen werden können (siehe auch Rayner, 1998). Derartige Untersuchungen stützen die Annahme, dass sich die visuellen Abtaststrategien mit Erfahrung optimieren (im Falle des Straßenverkehrs siehe auch z.B. Mourant & Rockwell, 1972; Crundall & Underwood, 1998): Experten suchen ein größeres Gebiet mit weniger Augenbewegungen effektiver ab als Novizen. Archambault et al. (1999) berichten, dass sich die *Kategorisierungsebene*, auf der Objekte gelernt werden (allgemein vs. spezifisch – siehe hierzu Rosch et al., 1976) auf die Entdeckung auswirkt (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.3). Sie boten Probanden in einer Lernphase allgemeine oder spezifische Informationen zu Objekten auf Fotografien dar. Beispielsweise wurde eine Tasse an einem Arbeitsplatz entweder nur als „Tasse“ (allgemein) oder als „Peters Tasse“ (spezifisch) beschrieben. Veränderungen von spezifisch gelernten Objekten wurden in der Regel bereits nach dem ersten Darbietungszyklus des angewendeten Flicker-Paradigmas entdeckt, während es bei allgemein gelernten Objekten bis zu neun mal länger dauerte.

Pringle et al. (2001) untersuchten den Zusammenhang von visueller Aufmerksamkeitsspanne und Veränderungsentdeckung in verschiedenen Altersgruppen. Die Aufmerksamkeitsspanne verringert sich generell mit zunehmendem Alter, da ältere Menschen ein engeres funktionelles Sehfeld aufweisen (siehe hierzu Ball et al., 1988). Entsprechend fanden Pringle et al. (2001), dass ältere Probanden ein eingeschränkteres funktionelles Sehfeld aufwiesen und länger brauchten um Veränderungen zu entdecken als jüngere. Harp & Rensink (1999) verglichen die Fähigkeit der Veränderungsentdeckung hinsichtlich des Alters und stellten fest, dass ältere Erwachsene irrelevante Reize zwar genauso effektiv herausfilterten wie jüngere Erwachsene, im Allgemeinen aber eine Verlangsamung der visuellen Aufmerksamkeit zeigten (zu weiteren Altersunterschieden bei der visuellen Suche siehe z.B. Rogers & Fisk, 1991; Humphreys & Kramer, 1997).

Nur wenige Untersuchungen beschäftigen sich bisher mit Veränderungsblindheit bei *spezifischen Populationen* mit neurologischen oder psychologischen Störungen. Ryan et al. (2000) z.B. boten amnestischen und gesunden Probanden eine Serie komplexer Bilder dar. Bei einer zweiten Präsentation blieben die Inhalte der Bilder entweder unverändert oder wurden modifiziert. Nur die gesunden Probanden blickten bei den modifizierten Bildern häufiger auf die veränderte Region als bei den unveränderten. Rutkowski et al. (2003) verglichen die Veränderungsentdeckung bei dyslexischen und gesunden Kindern. Sie veränderten einen von vier quadratisch angeordneten Buchstaben während der einmaligen Darbietung eines Blanks. Die

dyslexischen Kinder brauchten länger, um die Veränderungen zu entdecken als die gleichaltrigen „gesunden“ Kinder.

Weitere Faktoren, die sich auf Veränderungsblindheit auswirken, stellen die *Semantik* der visuellen Szene und die *Relevanz* der Veränderung für den Betrachter dar. So zeigten Davies & Hoffman (2002) anhand eines Flicker-Paradigmas, dass Veränderungen der Augen- oder Mundpartie in Bildern von aufrecht dargebotenen Gesichtern besser und schneller entdeckt werden als entsprechende Veränderungen in auf dem Kopf stehenden (und damit die Bedeutung störende – siehe auch Rock, 1975; Farah et al., 1995) Bildern. Dieselben Veränderungen wurden bei aufrechten Bildern auch besser entdeckt als bei solchen mit negativem Kontrast. Bei vergleichbarem Versuchsdesign fanden Austen & Enns (2003), dass Veränderungen in der Identität von aufrechten Gesichtern besser entdeckt werden als bei auf dem Kopf stehenden, keinen Unterschied fanden sie hingegen bei Veränderungen des Ausdrucks. Kelly et al. (2003) fanden entsprechende Vorteile mittels Flicker-Paradigma auch bei Fotografien alltäglicher Situationen, Shore & Klein (2000) hingegen nicht. Auch Yokosawa & Mitsumatsu (2003) fanden keine Unterschiede zwischen normal dargebotenen und semantisch „gestörten“ Fotografien. In ihrem Versuch verschoben sie, ohne Auswirkung auf die Reaktionszeit, in der gestörten Vergleichsbedingung, wie bei einem Schiebepuzzle, Teile der Fotos, in denen die Veränderungen stattfinden konnten. Widersprüchliche Ergebnisse liefern auch Studien zur semantischen Konsistenz. So boten Hollingworth & Henderson (1998, 1999, 2000, 2003) in computergenerierten Bildern alltäglicher Situationen semantisch konsistente (z.B. ein Stuhl im Wohnzimmer) und inkonsistente (z.B. Hydrant im Wohnzimmer) Veränderungen dar und fanden einen Vorteil für inkonsistente Veränderungen. In natürlicheren, dynamischen Szenen konnte der Vorteil für inkonsistente und daher unerwartete Veränderungen jedoch nicht bestätigt werden. In einer Studie von Simons et al. (2002) z.B. bat eine Versuchsleiterin (Frageperson), die zusammen mit einer weiteren Versuchsleiterin (Kontextperson) auftrat, auf dem Campus der Harvard-Universität vorbeilaufende Studenten um die Wegbeschreibung zum Universitätskrankenhaus. In der konsistenten Bedingung trat die Kontextperson entweder als verletzte Fußballspielerin mit Fußball in der Hand (Spieler-Kontext) oder als Krankenhausbesucherin mit Plüschhasen (Besucher-Kontext) auf. In der inkonsistenten Bedingung hielt die verletzte Spielerin den Hasen und die Krankenhausbesucherin den Fußball in der Hand. Beginn nun ein Student mit der Beschreibung, lief plötzlich eine Gruppe von acht eingeweihten Personen zwischen den Versuchsleiterinnen und dem Befragten hindurch und entfernte während dieser Verdeckung den Fußball oder den Plüschhasen der Kontextperson. Zwar fand sich bei anschließender Befragung erwartungsgemäß in allen Fällen Veränderungsblindheit, die

Konsistenzbedingungen (konsistent vs. inkonsistent) unterschieden sich jedoch nicht voneinander. Angelone et al. (2003) fanden vergleichbare Ergebnisse mit einer videobasierten Untersuchung, in der die Veränderungen (z.B. Änderung eines Basketballs oder einer Zeichnung einer Studentin, die ein Basketballshirt trägt) während eines Filmschnitts vorgenommen wurden.

In punkto Relevanz der Veränderung für den Betrachter zeigt eine Reihe von Flicker-Untersuchungen, dass relevante Veränderungen besser entdeckt werden als irrelevante (Rensink et al., 1997; O'Regan et al., 1999, 2000; Richard et al., 2002). Um die Inhalte von Fotografien alltäglicher Situationen zunächst hinsichtlich der Relevanz zu trennen, fragten Rensink et al. (1997) in einem Vorversuch fünf unabhängige Personen, welche Objekte (einer verbalen Beschreibung) einer Szene von marginalem oder aber zentralem Interesse für sie seien. Objekte waren von zentralem Interesse, wenn mindestens drei der fünf Personen sie entsprechend beurteilten, Objekte, die von niemandem erwähnt wurden, galten als marginal interessant. Im anschließenden Flicker-Versuch wurden zentrale Veränderungen (z.B. ein Hubschrauber aus der Sicht eines Piloten ändert seine Position) im Durchschnitt doppelt so schnell entdeckt als marginale (z.B. ein Geländer im Hintergrund einer Restaurant-Szene verändert die Höhe). Mit identischem Stimulusmaterial bestätigten O'Regan et al. (1999) den Vorteil für zentrale Veränderungen bei einer Mudsplash-Untersuchung und O'Regan et al. (2000) bei der lidschlagkontingenten Darbietung der Veränderungen. O'Regan et al. (2000) zeigten darüber hinaus, dass der Effekt auch dann bestehen bleibt, wenn der Abstand des Blickortes zum Ort der Veränderung kontrolliert wird. Schließlich zeigten Richard et al. (2002), dass verkehrsrelevante Veränderungen in Bildern (z.B. die Änderung eines Verkehrsschildes) schneller entdeckt werden als verkehrsunrelevante (z.B. die Änderung einer Hochspannungsleitung).

Einen weiteren sich auf die Veränderungsentdeckung auswirkenden Faktor stellen die *Arten der Veränderung* dar. Die einfachste, eindeutigste und gleichzeitig am besten erforschte Art ist die *Präsenz*, also das Hinzufügen (*Addition*) oder Verschwinden (*Subtraktion*) eines Objektes. Bis heute zeigten sich diesbezüglich widersprüchliche Ergebnisse in der Literatur. Bereits Phillips & Singer (1974) fanden mittels One-Shot-Design Vorteile für die Entdeckung von Additionen bei dargebotenen Quadraten. Ergebnisse, die von Stelmach et al. (1984) mit Punktmustern betätigt wurden. Agostinelli et al. (1986) zeigten durch Veränderungen an schematischen Zeichnungen alltäglicher Objekte (Änderungen von Teilen eines Objektes - z.B. der Stoßstange an einem Auto) jedoch einen Vorteil für Subtraktionen. Bei der Veränderung „kompletter“ Objekte in Zeichnungen alltäglicher Szenen hingegen fanden Miranda et al. (1992) bei Kindergarten- und Grundschulkindern erneut einen Vorteil für Additionen. Bei

erwachsenen Probanden bestätigten Nallan et al. (1994) diese Ergebnisse mit identischem Stimulusmaterial und in einem Folgeexperiment mit Fotografien. Ebenfalls mit Fotografien fanden Mondy & Coltheart (2000) wiederum einen Vorteil für Subtraktionen, unabhängig davon, ob Teile eines Objektes oder komplette Objekte verändert wurden. Cole et al. (2003) berichten sogar innerhalb einer Versuchsreihe von widersprüchlichen Ergebnissen. Während sie in einem Flicker-Versuch mit einfachen geometrischen Figuren einen Vorteil für Subtraktionen fanden und so die Ergebnisse von Mondy & Coltheart (2000) stützen, fanden sie bei identischem Stimulusmaterial mit einem One-Shot-Design (auch Mondy & Coltheart nutzen ein One-Shot-Design) hinsichtlich der Entdeckungsrate und der Entdeckungszeit überraschenderweise einen klaren Vorteil für Additionen. In einem Folgeversuch bestätigten sie diesen Vorteil mit Fotografien alltäglicher Gegenstände (Haushaltsgeräte auf einem Tisch).

Weitere Arten von Veränderungen, auf die im Folgenden nur kurz eingegangen wird, beziehen sich auf *Ort, Austausch, Identität, Farbe, Orientierung, Größe, Form, Detailliertheit und Natürlichkeit*. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich die hier dargestellten Arten unmöglich scharf voneinander trennen lassen, da sie sich zum Teil stark überschneiden. Ein Austausch beispielsweise beinhaltet genaugenommen eine Addition, eine Subtraktion und unter Umständen eine Veränderung von Ort, Identität, Farbe, Orientierung, Größe, Form, Detailliertheit und Natürlichkeit. Anhand natürlicher Objekte (z.B. Mützen oder Schlüssel), die zufällig an fünf von neun möglichen Orten auftauchten, zeigte Simons (1996), dass Veränderungen des Ortes eines Objektes besser entdeckt wurden als der Austausch zweier Objekte oder Veränderungen in der Identität eines Objektes. Diese Ergebnisse wurden von Keane et al. (2003) mit unbekanntem Phantasiefiguren, sogenannten Greebles (z.B. Tarr & Gauthier, 2000) oder Fribbles (Williams & Simons, 2000), bestätigt. Im Gegensatz zu den Autoren der zwei zuletzt erwähnten Studien unterscheidet beispielsweise Saiki (2003) hinsichtlich des Austausches weiter zwischen dem Ersetzen eines Objektes an Ort und Stelle durch ein anderes (*Replacement*) und dem Tausch zweier räumlich voneinander getrennten Objekte (*Switch*). In einer Untersuchung mit zweidimensionalem dynamischem Material (sich drehende, zeitweise verdeckte, bunte Scheiben) fand er erhebliche Vorteile in der Replacement-Bedingung. Mondy & Coltheart (2000) fanden bei Fotografien eine bessere Entdeckungsleistung für Veränderungen der Präsenz, verglichen mit Veränderungen des Ortes. Mit vergleichbarem Stimulusmaterial fanden auch Rensink et al. (nur bei Veränderungen marginalen Interesses - 1997) und Aginsky & Tarr (2000) diesen Vorteil und berichten darüber hinaus, dass auch Veränderungen der Farbe besser entdeckt werden als Veränderungen des Ortes. Wallis & Bühlhoff (2000) bestätigten mit dynamischem Material (Videos und virtuelle Umge-

bung) den Vorteil für Farbe und Präsenz gegenüber Ort und auch Orientierung (Rotation eines Objektes). In statischer virtueller Umgebung fanden auch Henderson & Hollingworth (1999) eine bessere Entdeckung für Präsenz (Subtraktionen), verglichen mit Veränderungen der Orientierung (Rotation). In Grimes' (1996) Versuch wurden Veränderungen der Farbe und Orientierung in Fotos besser entdeckt als Veränderungen der Größe. Henderson (1997) berichtet in einer sakkadenkontingenten Untersuchung mit gezeichneten Bildern (Kühe hinter einem Gartenzaun), dass Veränderungen der Form besser entdeckt werden als Veränderungen des Ortes. In bezug auf die Form berichten Barenholtz et al. (2003) in einer One-Shot-Untersuchung von einem erheblichen Vorteil für die Entdeckung konkaver Veränderungen (71%) an Phantasiepolygonen, verglichen mit konvexen Veränderungen (37%). Nach Austen & Enns (2000) werden lokale, also detaillierte Veränderungen (Änderung von Buchstaben, die wiederum einen Buchstaben bilden) schlechter entdeckt als globale, also undetaillierte (Änderung des Buchstabens, der aus einzelnen Buchstaben besteht). Hinsichtlich der Natürlichkeit zeigten z.B. Austen & Enns (2003), dass Veränderungen von Gesichtern besser entdeckt werden als Veränderungen von Buchstaben.

Inwieweit sich die *Art der Unterbrechung* der visuellen Wahrnehmung auf die Entdeckung von Veränderungen auswirkt, wurde bisher nur in wenigen Studien untersucht. Hollingworth & Henderson (2003) fanden mit computergenerierten Bildern alltäglicher Situationen, dass die Entdeckungsleistung bei Verdeckungen mit bedeutungslosen Mustern besser ist als bei Verdeckungen, die ebenfalls alltägliche Situationen zeigen (64% vs. 60%). Rensink et al. (2000) boten zwischen alltäglichen Fotos Blanks verschiedener Farbe dar. Weiß, Grau und Schwarz wirkten sich nicht auf die Entdeckung aus, unabhängig von der Art der Veränderung (Präsenz, Farbe, Ort) und der Relevanz (zentrales vs. marginales Interesse). Bei der Darbietung roter Blanks zeigte sich ein Vorteil für Farbänderungen marginalen Interesses. In einer weiteren Versuchsbedingung stellte sich heraus, dass Mudsplashes die Entdeckung von Veränderungen weniger hemmen als graue Blanks. Blackmore et al. (1995) verglichen künstlich provozierte Sakkaden (siehe Abschnitt 3.1) mit Blanks, jeweils bei alltäglichen Fotos, und fanden eine bessere Entdeckung in der Blank-Bedingung (65% vs. 55%). Shore & Klein (2000) verglichen Sakkaden in einer Untersuchung zu Unterschiedsblindheit, bei der zwei zu vergleichende alltägliche Fotos jeweils übereinander auf einem Papier dargeboten wurden, mit Blanks bei einem klassischen Flicker-Versuch mit denselben Fotos. Bei beiden Paradigmen kam es zu einem Vorteil für Veränderungen zentralen Interesses, wenn die Fotos aufrecht dargeboten wurden. Standen die Fotos jedoch auf dem Kopf, blieb dieser Vorteil nur noch in der Flicker-Bedingung bestehen.

Auch zeitliche und räumliche Aspekte der Stimuluspräsentation wirken sich entscheidend auf die Entdeckung von Veränderungen aus. Hinsichtlich der *Dauer der Unterbrechung* der visuellen Wahrnehmung zeigen sich in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse. So zeigten Phillips & Singer (1974) sowie Stelmach et al. (1984) bei künstlichem Stimulusmaterial (Punkte und Quadrate), dass die Entdeckungswahrscheinlichkeit mit zunehmender *Blank-Dauer* bis ca. 80 ms monoton abnimmt und dann bis über 300 ms stabil bleibt. Bei der Betrachtung von natürlichen Fotos berichten Rensink et al. (2000), dass die Entdeckungszeit mit zunehmender Blank-Dauer (nichtmonoton) ansteigt. In ihrer Studie verschlechterte sich die Leistung von 40 ms zu 80 ms, blieb bis 160 ms konstant und verschlechterte sich weiter zu 320 ms. Simons (1996) hingegen fand bei natürlichen Objekten keinen Unterschied in der Entdeckungswahrscheinlichkeit zwischen 250 ms und 4300 ms dargebotenen Blanks. Entsprechend fanden Hollingworth & Henderson (2003) bei Bildern alltäglicher Situationen keinen Unterschied zwischen 30 ms und 400 ms lang dargebotenen Verdeckungen (bedeutungslose Muster). Schließlich zeigten Henderson & Hollingworth (2003) bei einem sakkadenkontingenten Experiment mit natürlichen Bildern, dass sich die Entdeckungsleistung mit zunehmender *Sakkadendauer* (Amplituden von 2° bis 9°) nicht verschlechtert. Rensink et al. (2000) untersuchten bei natürlichem Material, ob sich die *Präsentationsdauer des Ausgangsbildes* auf die Veränderungsentdeckung auswirkt. Hierzu zeigten sie in einem Flicker-Versuch 8 s lang das Ausgangsfoto und verglichen diese Ergebnisse mit denen einer früheren Untersuchung mit identischem Stimulusmaterial, bei der das Anfangsbild 240 ms dargeboten wurde. Die verlängerte Darbietungsdauer wirkte sich nicht auf die Entdeckungsleistung aus.

Zu übereinstimmenden Ergebnissen kommen Untersuchungen, die die *Anzahl der potentiellen Veränderungsobjekte* in der visuellen Szene (*Set Size* – siehe z.B. Treisman & Gelade, 1980) variieren. So zeigte Rensink (2000a), dass die Entdeckungszeit von Orientierungsveränderungen bei Rechtecken mit Zunahme der Set Size (2, 6 oder 10 Objekte) linear zunimmt. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen Austen & Enns (2000, 2003) mit Veränderungen in Buchstaben und Gesichtern (jeweils 1, 3 oder 5 Objekte) und Zelinsky (2001) mit der Veränderung natürlicher Gegenstände (Werkzeug und Spielzeug – 1, 3 oder 9 Objekte). Zelinsky (2001) berichtet darüber hinaus, dass das Veränderungsobjekt bei geringerer Set Size öfter fixiert wird. Schließlich zeigten Fernandez-Duque & Thornton (2000), dass der Effekt auch bei Variation des oberen Bereichs (8 vs. 12 Objekte) bestehen bleibt: Orientierungsveränderungen bei einem von insgesamt acht Rechtecken wurden von 52% der Probanden entdeckt - bei zwölf Rechtecken sank die Entdeckungsrate bereits auf 40%.

Die Entdeckungsleistung hängt auch von der *Distanz der Veränderung zum Fixationsort* ab. Henderson & Hollingworth (1999) z.B. veränderten Objekte in computergenerierten Bildern alltäglicher Situationen, entweder während eine Sakkade den Blick zu einem zu verändernden Objekt hinbewegte oder von einem bereits veränderten Objekt wegbewegte. Sie fanden eine ungleich bessere Entdeckungsleistung, wenn das veränderte Objekt kurz vor oder unmittelbar nach der Veränderung fixiert wurde, verglichen mit Situationen, in denen das veränderte Objekt vor oder nach der Veränderung nicht fixiert wurde. Bei vergleichbarem Stimulusmaterial beobachteten Hollingworth et al. (2001) die Augenbewegungen in einem Flicker-Versuch und stellten fest, dass in über 80% der erfolgreich entdeckten Fälle die Veränderung direkt (also foveal) betrachtet wurde. Ein Folgexperiment zeigte, dass Probanden Veränderungen besser, schneller und mit weniger falschen Alarmen entdeckten, wenn sie ihre Augen frei bewegen durften, anstatt die Mitte der Szene zu fixieren. Bei lidschlagkontingenten Veränderungen in natürlichen Fotos zeigten O'Regan et al. (2000), dass zum Zeitpunkt der Veränderung die Entdeckungswahrscheinlichkeit ab 2° fovealer Distanz zum Ort der Veränderung stark abnimmt und bis etwa 10° konstant bleibt.

Mit der Auswirkung der *Dynamik* auf Veränderungsblindheit beschäftigten sich bisher drei uns bekannte Studien. In fünf verschiedenen statischen One-Shot-Experimenten fand Simons (1996) für Veränderungen der Identität Entdeckungsraten zwischen 40% und 78%. Um zu prüfen, ob diese Effekte womöglich ein Artefakt in der Verarbeitung statischer Bilder sein könnten, entwickelte er eine dynamische Vergleichssituation. Hierzu tauschte er in einem Videofilm, der das Gespräch zweier Frauen zeigte, während eines Kameraschwenks, eine große Cola-Flasche durch einen Serviettenspender aus. Keine von zehn Versuchspersonen bemerkte die Veränderung. Um einen direkteren Vergleich bemühten sich Williams & Simons (2000). In kurzen Filmen bewegten sie Fribbels von links nach rechts, die dabei kurz hinter einem schwarzen Quadrat verschwanden und danach verändert wieder auftauchen konnten. Ein Vergleich mit einer Bedingung, in der statische Bilder der Fribbels während eines Blanks verändert werden konnten, zeigte keinen Unterschied hinsichtlich der Entdeckungsleistung. Wallis & Bühlhoff (2000) bezogen zusätzlich die Illusion der Eigenbewegung in einen Vergleich mit ein. Den Probanden wurden dynamische (Fahr Simulator) und statische Bilder (dargebotene Standbilder des Simulators) von Verkehrssituationen dargeboten. Unter Verwendung des Flicker-Paradigmas konnten sich auf der Straße liegende Blöcke jeweils in ihrer Präsenz, Farbe, Form oder Orientierung verändern. Im Gegensatz zu Williams & Simon (2000) und im Einklang mit Simons (1996) zeigte sich ein Vorteil in der statischen Bedingung.

Bisher wurde in der vorliegenden Arbeit ausschließlich die explizite Entdeckung von Veränderungen besprochen. Eine ständig wachsende Anzahl von Untersuchungen weist jedoch darauf hin, dass unser visuelles System Veränderungen auch implizit, also ohne Bewusstwerdung, wahrnimmt (für eine ausführliche Übersicht siehe Thornton & Fernandez-Duque, 2002). So zeigten Fernandez-Duque & Thornton (2000) in einer One-Shot-Untersuchung mit künstlichem Material (Rechtecke), dass Probanden, die Veränderungen nicht entdeckt hatten, dennoch überzufällig häufig den Ort der Veränderung richtig geraten hatten. Williams & Simons (2000) instruierten ihre Probanden im oben beschriebenen Versuch, auf veränderte Fribbels mit einem Druck auf die D-Taste (different) und auf unveränderte Fribbels mit einem Druck auf die S-Taste (same) einer Tastatur zu reagieren. Ein Vergleich aller S-Antworten zeigte, dass auf nicht erkannte, aber stattgefundenen Veränderungen langsamer reagiert wurde als auf tatsächlich nicht stattgefundenen. Die längeren Reaktionszeiten bei den nicht erkannten Veränderungen werten die Autoren als Indiz für eine implizite Entdeckung. Rensink (1998, 2004) instruierte die Probanden in einer Flicker-Untersuchung mit natürlichen Fotos zweimal mit Knopfdruck zu reagieren. Erstens, wenn sie das Gefühl hatten (Mindsight) etwas habe sich verändert und zweitens, wenn sie die Veränderung bewusst erkannt hatten. Die Reaktionszeiten zeigten, dass einige Probanden verlässlich eine Veränderung „fühlten“ – einige Sekunden bevor sie sich dieser bewusst wurden. Hayhoe (2000) berichtet bei Nichtentdeckung von sakkadenkontingent dargebotenen künstlichen Veränderungen (Quadrate) über verlängerte Fixationsdauern für veränderte Objekte gegenüber unveränderten. Hollingworth et al. (2001) unterstützen Hayhoes Ergebnisse. Sie veränderten Objekte in natürlichen Bildern, während eine Sakkade den Blick von selbigen wegbewegte und stellten fest, dass Refixationen von Objekten, die verändert wurden, länger dauerten (749 ms) als die von unveränderten (499 ms).

3.3 Theorien zur Erklärung von Veränderungsblindheit

Das Entdecken einer Veränderung benötigt entweder ein die Veränderung markierendes Bewegungssignal oder die geistige Repräsentation der Merkmale, die sich verändert haben. Bei Untersuchungen zur Veränderungsblindheit wird das Bewegungssignal entweder durch Augenbewegungen, einen Blank oder Distraktoren verdeckt oder maskiert. Der Grund für das Nichtentdecken von Veränderungen kann also nur in einer unzureichenden oder nicht bewusst werdenden Merkmalsrepräsentation liegen (siehe hierzu auch Simons, 2000). Im Folgenden werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, fünf theoretisch begründete Modelle zur Erklä-

rung von Veränderungsblindheit beschrieben, die sich mit möglichen Arten der Merkmalsrepräsentation befassen. Alle Modelle sind in Abbildung 3.5 illustrativ dargestellt.

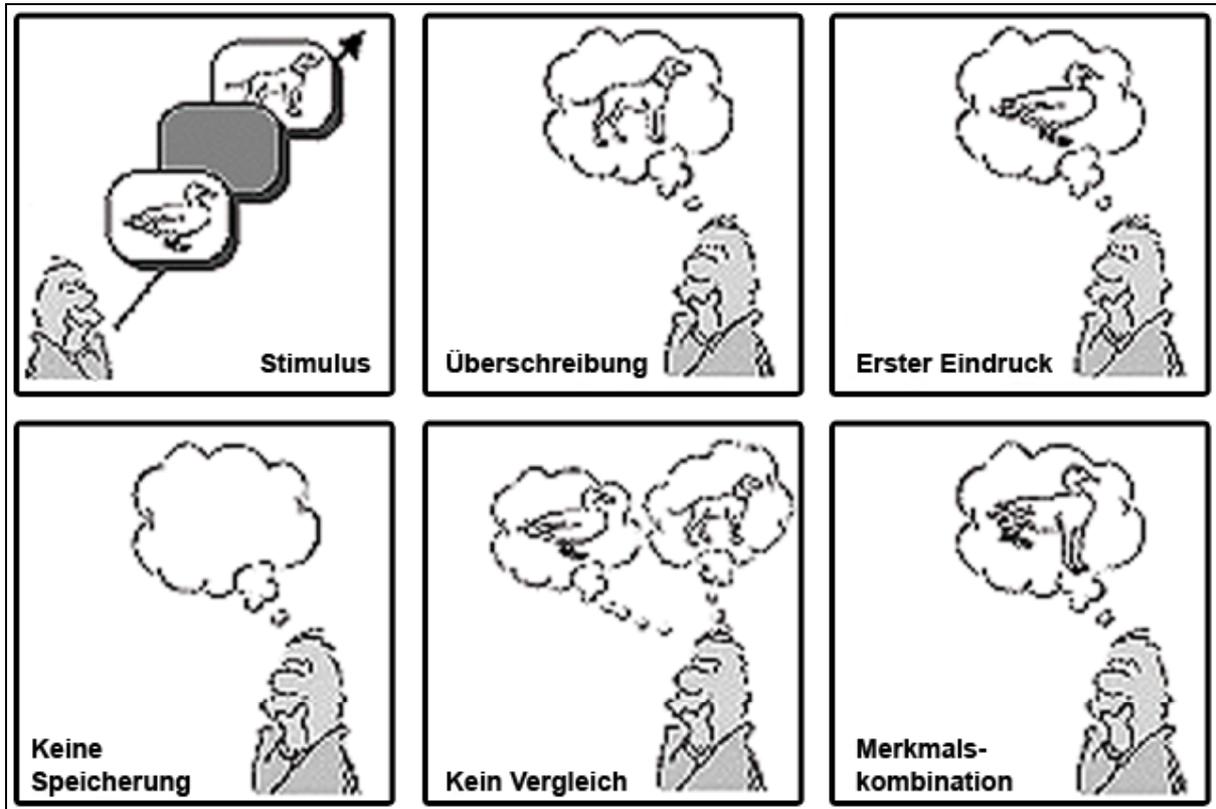


Abbildung 3.5. Darstellung der fünf im Text beschriebenen Erklärungsmodelle zur Veränderungsblindheit (modifiziert nach Simons, 2000).

Eine in der Literatur stark verbreitete Erklärung für Veränderungsblindheit ist die *Überschreibungshypothese*, die besagt, dass die Repräsentation des ersten Bildes, z.B. durch einen Blank oder durch das nachfolgende Bild, überschrieben wird. Merkmale aus der Ausgangsszene, die nicht aufmerksam enkodiert wurden, werden demnach vollständig durch die Repräsentation der veränderten Szene ersetzt. Eine erfolgreiche Entdeckung von Veränderungen ist daher nur für zuvor aufmerksam enkodierte Objekte möglich. Tatler (2001) berichtet, dass die Überschreibung der Ausgangsszene innerhalb der ersten 400 ms, 50% bereits innerhalb der ersten 100 ms nach dem Erscheinen der neuen Szene stattfindet. Die Überschreibungshypothese eignet sich vor allem zur Erklärung von Veränderungsblindheit für einfache visuelle Stimuli, wie sie in der klassischen Maskierungsforschung (z.B. Kahneman, 1968; Intraub, 1980) benutzt werden.

Die *Hypothese des ersten Eindrucks* besagt, gegenteilig zur Überschreibungshypothese, dass der Betrachter nur die Details des ersten Bildes enkodiert, nicht die des zweiten. So berichtet z.B. Friedman (1979), dass die Merkmale der Anfangsszene enkodiert werden, um die allge-

meine Bedeutung (*Gist*) zu erfassen. Bleibt diese Bedeutung in der veränderten Szene gleich, werden die bereits enkodierten Merkmale nicht erneut überprüft, d.h. es existiert keine Repräsentation der veränderten Szene. Simons et al. (eingereicht) fanden Ergebnisse, die diese Annahme stützen. In ihrer Studie wurde der Hauptdarsteller eines Filmes während einem Schnitt durch einen anderen ersetzt (siehe hierzu auch Abschnitt 3.1). Die 67% der Probanden, die keine Veränderung bemerkten, beschrieben bei einer anschließenden Befragung mehrheitlich dennoch die Merkmale des ersten Darstellers.

Ein aktuell stark diskutiertes Erklärungsmodell beruht auf der Annahme, dass aufgrund der Begrenzung des visuellen Arbeitsgedächtnisses auf ein bis vier Details (z.B. Luck & Vogel, 1997; Saiki, 2002) praktisch *keine Speicherung* von Merkmalen stattfindet - weder bei der Anfangsszene, noch bei der veränderten Szene. Stattdessen nutzt der Betrachter die Umgebung als externen Wahrnehmungsspeicher (z.B. Stroud, 1955; Gibson, 1986; Dennet, 1991, O'Regan & Noë, 2001) und richtet seine visuelle Aufmerksamkeit nur auf die jeweils für ihn wichtigsten Aspekte aus. Lediglich die Information, die bewusst aus diesem Speicher abstrahiert wird, bleibt über die Veränderung einer Szene hinaus bestehen. Für Entdeckungsaufgaben, bei denen die veränderte Szene bis zur Reaktion des Probanden sichtbar bleibt, sagt dieses Modell und das der Überschreibung eine identische Leistung voraus. Vertreter einer abgeschwächteren Variante (z.B. Ballard et al., 1997) gehen davon aus, dass dennoch bestimmte Informationen von einer Szene zur nächsten erhalten bleiben. Demnach werden beispielsweise Orte von Objekten, aber nicht ihre spezifischen visuellen Merkmale gespeichert, womöglich weil gerade solche Informationen von einem Moment zum anderen zur Handlungskontrolle benötigt werden (Wang & Simons, 1998). Genauere, momentan für den Betrachter wichtige Informationen werden „gerade rechtzeitig“ zur Lösung einer aktuellen Aufgabe aufgenommen („Just-In-Time-Modelle“ – siehe z.B. Hayhoe, 2000, Triesch et al., 2003).

Weiterhin ist es denkbar, dass der Betrachter eine Repräsentation beider Bilder formt, ohne sich über einen Unterschied bewusst zu werden, da *kein Vergleich* der beiden Repräsentationen stattfindet. Unser visuell-kognitives System geht solange davon aus, dass sich Anfangs- und Folgebild nicht unterscheiden, bis eine Änderung der allgemeinen Bedeutung (z.B. durch einen Hinweis des Versuchsleiters) einen expliziten Vergleich auslöst. Die zahlreichen Untersuchungen zur impliziten Veränderungsentdeckung (siehe hierzu Abschnitt 3.2) sprechen dafür, dass bei expliziter Nichtentdeckung ein bewusster, aufmerksamer Vergleich versäumt wird. Simons et al. (eingereicht) führten in diesem Zusammenhang eine Variation der bereits in Abschnitt 3.2 beschriebenen Untersuchung (Simons et al., 2002) durch. Ein Versuchsleiter mit einem Basketball in der Hand fragte einen Fußgänger nach dem Weg. Während der Weg-

beschreibung des Fußgängers lief eine Gruppe Jugendlicher zwischen den beiden Personen hindurch und entwendete gleichzeitig den Basketball. Die anschließende Frage, ob sie eine Veränderung am Versuchsleiter entdeckt hätten, verneinte die Mehrheit der Versuchspersonen. Wurde jedoch explizit danach gefragt, ob der Versuchsleiter einen Basketball in der Hand hatte, erinnerten sich wiederum mehr als die Hälfte an diesen, zum Teil sogar an seine Farbe. Die Versuchspersonen nahmen also den Versuchsleiter ohne Ball wahr und konnten sich dennoch an den Ball erinnern. Sie speicherten Aspekte beider Repräsentationen, bis zum Zeitpunkt der Befragung führten sie aber offenbar keinen Vergleich durch.

Das Modell der *Merkmalskombination* entspricht in seiner strengsten Form der Theorie des „visuellen integrativen Puffers“ (*Visual Buffer* – Rayner, 1975; McConkie & Rayner, 1976). Diese Theorie geht davon aus, dass detailgetreue Abbilder einer Szene solange in einem visuellen Puffer gespeichert werden, bis das Abbild der nächsten Szene verfügbar ist und diese beiden Bilder schließlich zu einer aktualisierten Wahrnehmung der Umgebungsinformation miteinander verschmelzen. In den 1970er und 1980er Jahren wurde so eine stabile, detailgetreue visuelle Wahrnehmung von einer Fixation zur nächsten erklärt. Unter anderem zeigte letztlich das Phänomen der Veränderungsblindheit, dass unsere Wahrnehmung keineswegs ein genaues Abbild der Umwelt darstellt und die Annahme des klassischen visuellen Puffers wurde verworfen (z.B. Bridgeman & Mayer, 1983; Irwin, 1991). Eine „entschärfte“ Version geht davon aus, dass einige Merkmale der ersten Szene, andere der zweiten entnommen werden. Das Resultat ist eine neu konstruierte und mitunter nicht der Realität entsprechende, kohärente Repräsentation. Dieser Ansatz wird auch häufig zur Erklärung „manipulierter“ Zeugnisaussagen herangezogen, bei denen sich die Erinnerung an ein Ereignis aus einer Kombination tatsächlich wahrgenommener und nachträglich suggerierter Details ergibt (siehe auch Loftus, 1979). In diesem Zusammenhang zeigten Loftus & Palmer (1979) Probanden Bilder von einem Fahrzeugzusammenprall und fragten anschließend, mit welcher Geschwindigkeit die Fahrzeuge aufeinander gefahren seien. Die Intensität des Verbs, das den Zusammenprall beschreibt, wurde variiert: Statt „fahren“ wurde z.B. „berührt“ oder „geknallt“ benutzt. Je intensiver der Zusammenprall suggeriert wurde, desto schneller wurde die Geschwindigkeit geschätzt. Das jeweilig benutzte Verb führte die Probanden also dazu, ihre Repräsentation kohärent zu „rekonstruieren“. Bisher wird die Hypothese der Merkmalskombination, nach unserem Wissens, von keiner Studie zur Veränderungsblindheit unterstützt (siehe auch Simons, 2000).

Keiner der bis hier dargestellten Ansätze reicht allein aus, um die Effekte der Veränderungsblindheit ausreichend erklären zu können. Da der zentrale Mechanismus zur expliziten Entde-

ckung einer Veränderung die visuelle Aufmerksamkeit ist, muss diese in einem theoretischen Modell entsprechend berücksichtigt werden. Ein solches, größtenteils auf den in Abschnitt 2.4 beschriebenen Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit theoretisch aufbauendes, Modell stellt die *Kohärenztheorie* von Rensink (2000b, 2002) dar. Diese Theorie weist eine triadische Architektur mit drei, größtenteils voneinander unabhängigen, Systemen auf (Abbildung 3.6) und wird im Folgenden ausführlich beschrieben.

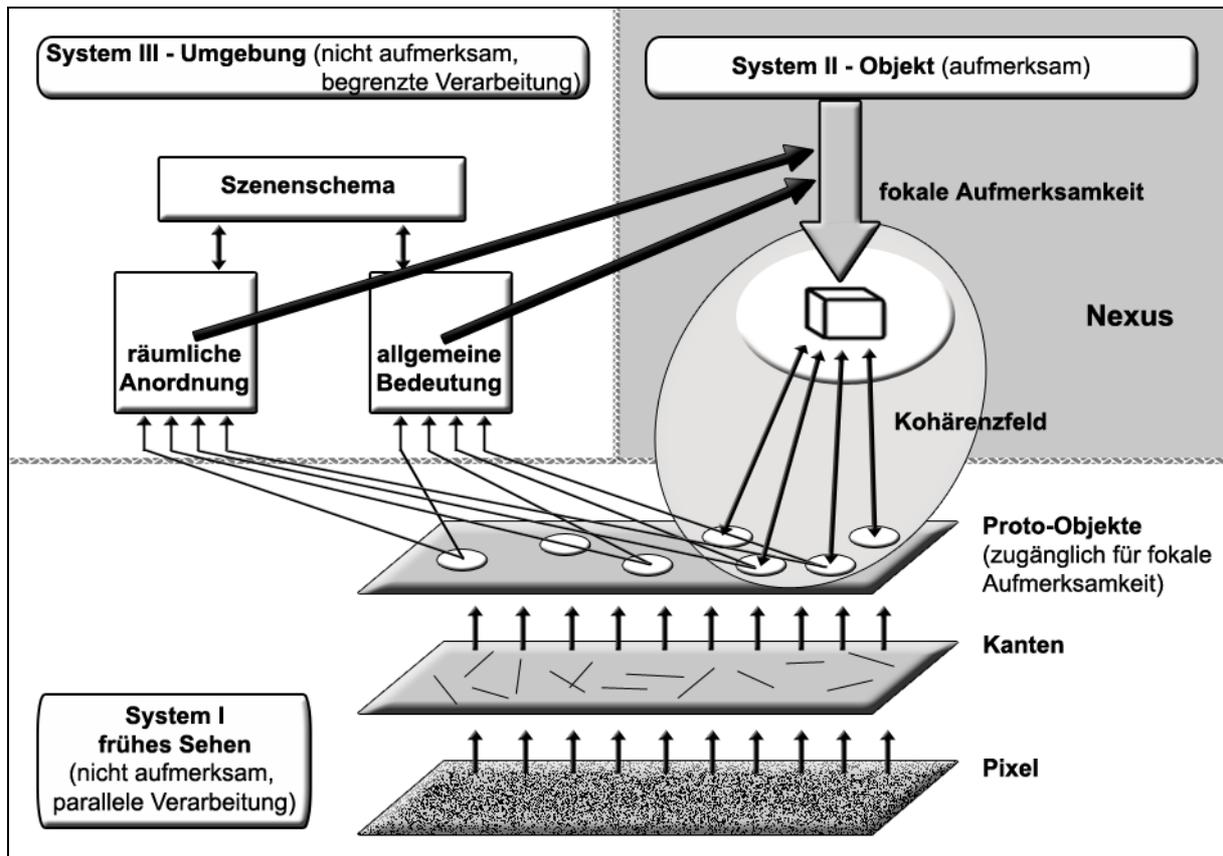


Abbildung 3.6. Triadische Architektur der visuellen Wahrnehmung: Drei überwiegend voneinander unabhängige, miteinander interagierenden Systeme (modifiziert nach Rensink, 2000b).

Auf einer, der fokalen Aufmerksamkeit vorgelagerten Ebene des frühen Sehens (System 1) werden aus einzelnen Pixeln bei der Photorezeption - über Kantenerkennung durch (quasi)lineares Filtern - sogenannte *Proto-Objekte* gebildet. Sie beschreiben jeweils einige einfache räumliche Aspekte einer Szene und stellen die „niedrigsten“, für die Aufmerksamkeit zugänglichen, Strukturen dar. Die Proto-Objekte werden schnell und parallel über das gesamte visuelle Feld gebildet. Sie sind zeitlich und räumlich unbeständig und können daher entweder von neuen Stimuli an derselben Stelle überschrieben werden (siehe auch DiLollo, 1980) oder zerfallen nach wenigen hundert Millisekunden (Rensink et al., 1997).

Die fokale Aufmerksamkeit (System 2) „greift“ sich dann wenige Proto-Objekte aus diesem sich ständig regenerierenden Strom und formt diese zur individuellen hochauflösenden Repräsentation eines Objektes, die aktiv im visuellen Arbeitsgedächtnis gehalten wird und damit zeitlich und räumlich an Stabilität gewinnt. Die Kapazität der fokalen Aufmerksamkeit beschränkt sich hierbei auf die Repräsentation eines Objektes pro Zeitpunkt (siehe auch Deubel & Schneider, 1996; Garavan, 1998). Die Interaktion der fokalen Aufmerksamkeit mit den nicht aufmerksamen Strukturen des frühen Sehens findet über einen sogenannten *Nexus* statt. Der Nexus stellt eine Verbindungsstruktur dar, die eine zusammenfassende Beschreibung des aufmerksam wahrgenommenen Objektes enthält, z.B. Informationen über die Größe, Form oder dominierende Farbe. Interne Strukturen des Nexus' ermöglichen eine Verarbeitung und kurze Speicherung dieser Informationen. Wird nun ein Proto-Objekt aufmerksam „betrachtet“, öffnet sich eine Verbindung zwischen ihm und dem Nexus, die einen wechselseitigen Kommunikationsfluss in einem interaktiven *Kohärenzfeld* (vgl. auch *object files* – Kahneman et al., 1992) ermöglicht. „Hochfließende“ Informationen liefern dem Nexus Beschreibungen der Eigenschaften des Proto-Objektes, während „runterfließende“ Informationen dem Proto-Objekt Stabilität verleihen. Vier bis sechs Proto-Objekte können gleichzeitig im Kohärenzfeld bearbeitet werden (siehe hierzu auch Pylyshyn & Storm, 1988). Die so gewonnenen stabilen, stets aktualisierten Proto-Objekte formen letztlich die kohärente Repräsentation eines Objektes, bleiben auch über kurze Unterbrechungen der visuellen Aufmerksamkeit bestehen und ermöglichen so das Erkennen einer Veränderung. Sobald sich jedoch die Aufmerksamkeit von einem Objekt löst, bricht der Kommunikationsfluss, die Repräsentation verliert ihre Kohärenz und zerfällt wieder in Proto-Objekte. Dabei kommt es zu keinem oder nur einem sehr geringen Nachhalten der Aufmerksamkeit (siehe auch Irwin, 1996; Wolfe, 1996; Horowitz & Wolfe, 1998). Das explizite Erkennen von Veränderungen ist also nur mittels fokaler Aufmerksamkeit möglich. Wird der Ort der Veränderung zum Zeitpunkt der Veränderung nicht betrachtet, kommt es zu Effekten der Veränderungsblindheit (inklusive Inattentional Blindness). Die begrenzte Menge an Information, die zu einem Zeitpunkt aufmerksam aufgenommen werden kann, erklärt nicht nur das zum Teil erhebliche Ausmaß des Phänomens, sondern auch das mögliche Nichtentdecken betrachteter Veränderungen: Wenn sich die fokale Aufmerksamkeit auf ein Objekt (im weiteren Sinne) in der Umwelt richtet, können nur wenige Details zeitgleich im *Kohärenzfeld* repräsentiert werden. Verändert sich ein solches repräsentiertes Detail, wird dies bemerkt. Bei Veränderungen nicht repräsentierter Details kommt es trotz „Betrachtung“ zu Veränderungsblindheit. Wenn aber zu einem Zeitpunkt nur ein Objekt kohärent repräsentiert werden kann und selbst diese Repräsentation begrenzt ist, warum neh-

men wir unsere Umgebung trotzdem ganzheitlich und detailliert wahr? Rensink (2000b) orientiert sich diesbezüglich an den oben erwähnten Keine-Speicherung-Modellen und beschreibt unsere visuelle Wahrnehmung als *virtuelle Repräsentation*, die von uns real empfunden wird. Das Prinzip ähnelt einem Rechner, der auf die Seiten des Internets zugreift. Kein Rechner kann alle Seiten und deren ständige Änderungen in seinem Speicher halten. Wenn der Anwender nun eine Seite abrufen, überprüft der Rechner, ob er diese bereits in seinem begrenzten Speicher hat. Ist dies nicht der Fall, lädt er die entsprechende Information. Geschieht dies schnell genug, hat der Anwender den Eindruck, dass der Rechner die gesamten Informationen des Internets enthält. In Wirklichkeit liegen die Informationen jedoch nicht simultan vor, sondern werden dann (just in time) zugänglich, wenn sie gebraucht werden (zur virtuellen Repräsentation in Computernetzwerken siehe auch Tanenbaum, 1976). Um derartige „virtuelle“ Repräsentationen erfolgreich nutzen zu können, benötigt das menschliche Sehen Augenbewegungen und Aufmerksamkeitsverschiebungen. Die von uns als real empfundenen Repräsentationen sind also nicht zwangsläufig komplett oder richtig (O'Regan & Noë, 2001).

Eine Reihe weiterer Fragen blieb bislang ungeklärt: Wie werden Augenbewegungen und Aufmerksamkeitsverlagerungen gesteuert? Wie kann der Ort eines Objektes bekannt sein, bevor sich die Aufmerksamkeit dorthin verlagert? Wenn Aufmerksamkeit keinen nachhaltenden Effekt hat, warum existiert auch dann eine Erinnerung an eine Szene, wenn die Aufmerksamkeit bereits von dieser abgezogen wurde? Eine befriedigende Antwort auf diese und ähnliche Fragen kann nach Rensink (2000b) nur eine vollständige, integrative Theorie des Sehens geben. Er betont, dass in einer derartigen Theorie zuerst die Annahme verworfen werden muss, dass nur eine einzelne Form der Aufmerksamkeit existiert. Wie viele andere (vgl. auch Abschnitt 2.4) vermutet auch er, dass die visuelle Verarbeitung auf mehreren Aufmerksamkeitsebenen stattfindet (siehe z.B. Allport, 1992; Velichkovsky, 2002). So könnte das Aufmerksamkeitssystem für Objektwahrnehmung eines unter vielen anderen sein, die zeitgleich und überwiegend unabhängig voneinander arbeiten. Entsprechend fügt Rensink (2000b) den zwei bereits dargestellten Systemen ein drittes nicht-aufmerksames System mit begrenzter Kapazität (System 3 - Abbildung 3.6) hinzu, das mindestens drei wichtige Informationen zur Umgebung liefert. Es erfasst die abstrakte *allgemeine Bedeutung* einer Szene (z.B. ob es sich um einen Hafen, eine Stadt oder einen Hinterhof handelt) und führt die Aufmerksamkeit zu den Objekten, die in diesem Kontext am wichtigsten sind. Die allgemeine Bedeutung ist bereits 120 ms ab Präsentation einer Szene bestimmt (Biederman, 1981) und bleibt über Augenbewegungen sowie über Veränderungen in der Komposition und Anordnung von Objekten konstant (Friedman, 1979). Zwei Bedeutungen können gleichzeitig, auch

aus stark verzerrten Bildern, extrahiert werden (Olivia & Schys, 1997). Weiterhin nimmt System 3 nach wenigen Millisekunden, ohne Bezug auf semantische Eigenschaften (Hochberg, 1968), die *räumliche Anordnung* von Objekten in einer Szene wahr und führt die Aufmerksamkeit so schneller zu Orten einer bestimmten Struktur. Die Bestimmung der Anordnung bleibt über kurze Unterbrechungen der visuellen Wahrnehmung (Sanocki & Epstein, 1997) und sogar bei Abwesenheit visueller Aufmerksamkeit (Chun & Nakayama, 2000) bestehen. Sie ist unabhängig von Augenbewegungen und kommt daher als Steuerungsmechanismus der Augenbewegungen und Aufmerksamkeitsverschiebungen in Frage. Während die allgemeine Bedeutung und die räumliche Anordnung Informationen sind, die im Arbeitsgedächtnis gehalten werden und daher für begrenzte Dauer zur Verfügung stehen, ruft System 3 ein im Langzeitgedächtnis gespeichertes abstraktes *Szenenschema* ab. Über die Interaktion mit den beiden anderen Systemen erleichtert es so wahrscheinlich die Wahrnehmung eines Objektes in der Szene. Die hier vorgestellte Architektur dreier überwiegend voneinander unabhängigen, miteinander interagierenden Mechanismen stellt einen nützlichen Ausgangspunkt für eine integrative Theorie des Sehens dar, die gleichermaßen physiologische Grundlagen der visuellen Wahrnehmung, die geistige Repräsentation ihrer Inhalte und die Grenzen der visuellen Aufmerksamkeit (z.B. Veränderungsblindheit) berücksichtigt. Die nicht- bzw. voraufmerksamen Systeme 1 und 3, deren Informationen nicht bewusst wahrgenommen werden, ermöglichen zudem eine implizite Entdeckung von Veränderungen, also eine Entdeckung ohne Beteiligung der fokalen Aufmerksamkeit. Weiterhin deutet der Ansatz einen interessanten Perspektivwechsel an: Die Repräsentation einer visuellen Szene ist nicht nur eine Struktur, die durch Augenbewegungen und Aufmerksamkeitsverschiebungen gebildet wird, sondern die Repräsentation selbst kann Augenbewegungen und Aufmerksamkeit steuern.

4 Experiment 1: Variation von Unterbrechungsart und Relevanz in natürlicher statischer Umgebung

4.1 Einleitung

Mehr als 50% aller Kollisionen im Straßenverkehr werden durch eine fehlende oder verspätete Wahrnehmung der Gefahrenquelle mitverursacht (Nagayama, 1978). Bei einem gesunden Menschen zeigen sich Lidschläge mit einer mittleren Dauer von 150 ms durchschnittlich 12 bis 15 mal pro Minute (Barbato et al., 2000). Sakkaden mit einer mittleren Dauer von 35 ms werden durchschnittlich vier mal pro Sekunde initiiert (Unema, 1995). Dies bedeutet, dass zu etwa 18% der (wachen) Zeit die visuelle Informationsaufnahme allein durch natürliche Unterbrechungen gestört ist. Es liegt daher nahe, dass Veränderungsblindheit beim Autofahren eine Ursache für zu spät oder nicht erkannte Gefahren im Straßenverkehr sein könnte. Wechselt beispielsweise eine Ampel genau in dem Moment von grün auf rot, in dem der Fahrer in eine andere Richtung blickt, birgt das die Gefahr, dass er diese Veränderung beim Zurückblicken nicht oder zu spät erkennt und gegebenenfalls die rote Ampel sogar überfährt. Auch kurze Blendungen von entgegenkommenden Fahrzeugen oder Schlamm, der auf die Windschutzscheibe spritzt, können im ungünstigen Fall Bewegungssignale von Veränderungen verdecken bzw. von ihnen ablenken.

Zahlreiche Untersuchungen zeigten, dass Blanks, Lidschläge und Sakkaden im Einzelnen Veränderungsblindheit hervorrufen, ein methodisch befriedigender direkter Vergleich dieser drei wichtigsten Unterbrechungsarten steht, nach unserem derzeitigen Erkenntnisstand, bisher noch aus. Er ist jedoch dringend erforderlich, um die Ergebnisse von unterschiedlichen Untersuchungen in bezug auf ihre Vergleichbarkeit angemessen zu interpretieren.

Daher untersuchten wir explorativ, in welchem Ausmaß sich die drei, für den Straßenverkehr gegebenenfalls gefährlichen, Unterbrechungsarten Blank, Lidschlag und Sakkade jeweils auf die (Nicht-)Entdeckung plötzlich auftauchender bzw. verschwindender verkehrsrelevanter und -irrelevanter Objekte in Fotos auswirken. Zusätzlich interessierte uns, inwieweit die Parameter Fixationsort, Fixationsdauer und Sakkadenamplitude ergänzende Informationen über die Wahrnehmung (explizit vs. implizit) von Veränderungen und die Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit (ambient vs. fokal) vor der (Nicht-)Entdeckung einer Veränderung liefern.

4.2 Methode

4.2.1 Probanden

An dem Versuch nahmen 24 Psychologiestudenten der TU-Dresden (13 weibliche und 11 männliche, im Alter von 20 bis 30 Jahren) teil. Sie wurden aus dem Bekanntenkreis des Versuchsleiters und über Aushänge rekrutiert. Alle Probanden verfügten über normales oder entsprechend korrigiertes Sehvermögen, waren im Besitz einer Fahrerlaubnis, hatten die Nacht zuvor mindestens sechs Stunden geschlafen und standen nicht unter Alkohol- oder Medikamenteneinfluss. Sie wurden für ihre Mühe entweder mit 7 Euro oder mit zwei (für die Zulassung zum Hauptstudium nötigen) Versuchspersonenstunden belohnt. An einer Untersuchung zur Veränderungsblindheit hatten sie zuvor noch nicht teilgenommen.

4.2.2 Stimuli und Versuchsdesign

Von Videos einer Vorgängeruntersuchung (Dornhöfer & Pannasch, 2000) wurden insgesamt 60 Standbilder extrahiert. Sie zeigten Verkehrssituationen aus der Sicht des Fahrers und wurden in eine Auflösung von 800 x 600 Pixel mit 24 Bit Farbtiefe konvertiert. Mittels digitaler Bildbearbeitung wurden an jedem Bild vier Veränderungen erzeugt, so dass inklusive unveränderter Bilder 300 verschiedene Bilder vorlagen. Das so gewonnene Stimulusmaterial wurde allen Probanden in drei Versuchsblöcken zu je 100 Durchgängen präsentiert, getrennt nach den unabhängigen Variablen *Unterbrechungsart* und *Relevanz*. Die Präsentation erfolgte in einer von vier zuvor festgelegten quasi-zufälligen Reihenfolgen.

Die Unterbrechungsart wurde vierfach gestuft: Jeweils 60 veränderte Bilder wurden während eines *Lidschlags*, einer *Sakkade* oder eines *Blanks* (112 ms Dauer) auf einem Computermonitor dargeboten. In der Kontrollbedingung wurde das veränderte Bild während einer *Fixation*, also unverdeckt dargeboten. Die Probanden sollten auf entdeckte Veränderungen schnellstmöglich mit einem Knopfdruck (linke Maustaste) reagieren. Da der künstliche Blank als Hinweisreiz für eine Veränderung genutzt werden könnte, wurden in der Blank-Bedingung zusätzlich 60 *Catch Trials* dargeboten, d.h. die Hälfte der Bilder veränderte sich während eines *Blanks* nicht. Ein Durchgang startete jeweils mit einem Blank von 1,5 s. Danach wurde das Ausgangsbild für 4 s bis 6 s dargeboten, je nach dem wie lange es dauerte, bis die Probanden eine Fixation, eine Sakkade oder ein Lidschlag ausführten. In den Blank-Durchgängen wurde das Auftauchen eines *Blanks* nach der Präsentation des Ausgangsbildes entsprechend zwischen 4 s und 6 s variiert. Bei den vergleichsweise selten auftretenden Lidschlägen wurde ein Durchgang automatisch abgebrochen, wenn ein Lidschlag 6 s nach Darbietung des An-

fangsbildes nicht erfolgte. Ein Durchgang endete 5 s nach Erscheinen des zweiten (in der Regel veränderten) Bildes oder durch Knopfdruck. Den Nullpunkt für die Messung der Entdeckungszeit stellte der Zeitpunkt dar, bei dem eine Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung zu Ende war. Das heißt, in der Blank- und Fixations-Bedingung wurde die Entdeckungszeit von dem Moment an gemessen, in dem das zweite Bild auftauchte, in der Sakkaden-Bedingung vom Start der nächsten Fixation. In der Lidschlag-Bedingung wurde die Entdeckungszeit entweder von dem Moment an gemessen, in dem der Lidschlag vorbei war (wenn er während einer Fixation auftauchte) oder vom Start der nächsten Fixation (wenn er während einer Sakkade auftrat).

Hinsichtlich der Relevanz wurden die Veränderungen zweifach gestuft: Sie waren entweder *verkehrsrelevant* oder *verkehrsirrelevant* (Abbildung 4.1).

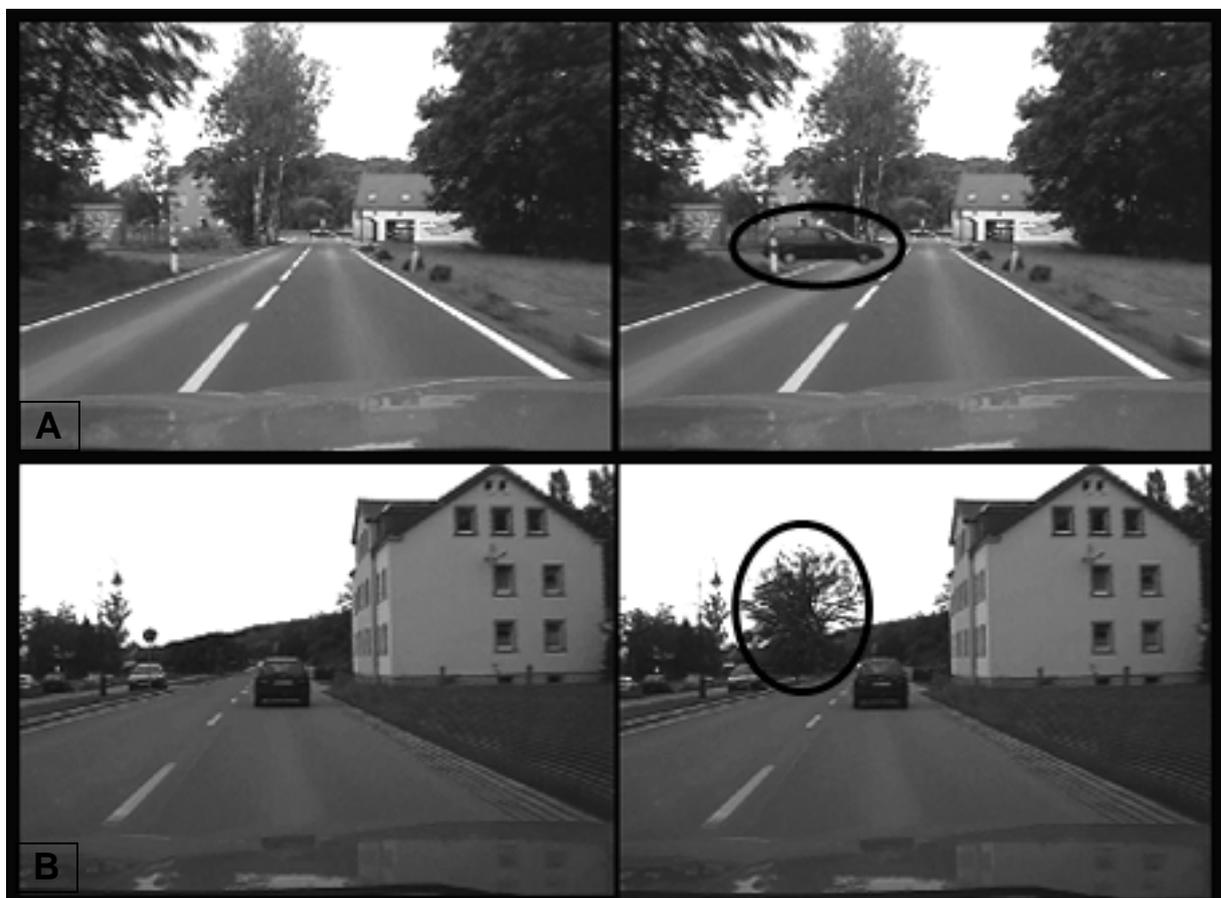


Abbildung 4.1. Beispielstandbilder aus dem Experiment. (A) verkehrsrelevante Veränderung: Ein Auto taucht plötzlich aus dem linken Feldweg auf (B) verkehrsirrelevante Veränderung: Ein Baum taucht plötzlich auf dem Grünstreifen auf.

Verkehrsrelevante Veränderungen erfordern ein sofortiges Reagieren des Fahrers zur Vermeidung einer gefährlichen Situation. Im hier beschriebenen Versuch umfassten sie Objekte (z.B.

Fußgänger, Autos oder Fahrräder), die vor den Probanden auftauchten oder verschwanden, oder Veränderungen an solchen Objekten, z.B. das Aufleuchten (oder Erlöschen) von Bremslichtern. Verkehrsirrelevante Veränderungen stellten alle anderen Arten von Veränderungen dar, z.B. das Auftauchen (oder Verschwinden) eines Baumes am Straßenrand oder eines Fensters an einem Haus. Die Unterteilung in verkehrsrelevante und verkehrsirrelevante Veränderungen wurde zuvor durch sechs unabhängige Beurteiler mit einer 95-prozentigen Übereinstimmung getroffen.

Die *Art der Veränderungen* (Präsenz, Größe, Ort und Farbe) wurde über alle Veränderungen hinweg ausbalanciert.

Es wurden die Einflüsse der unabhängigen Variablen auf die abhängigen Variablen *Entdeckungswahrscheinlichkeit* und *Entdeckungszeit* sowie auf die *Sakkadenamplitude*, die *Fixationsdauer* und den *Fixationsort* untersucht.

4.2.3 Hypothesen

Obwohl diese Untersuchung, wie bereits eingangs erwähnt, explorativer Natur ist, hatten wir unter Berücksichtigung der oben besprochenen Literatur folgende theoretisch begründete Annahmen:

Wir erwarteten einen Effekt der klassischen Veränderungsblindheit, d.h. eine geringere Entdeckungsrate bei Veränderungen, die während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung dargeboten werden, verglichen mit der unverdeckten Kontrollbedingung. Auch sollten Veränderungen, die während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung stattfinden, später entdeckt werden als in der Kontrollbedingung.

Hinsichtlich der einzelnen Unterbrechungsarten (Lidschlag, Sakkade und Blank) interessierte uns, ob sich diese in der Entdeckungsrate und der Entdeckungszeit unterscheiden.

Relevante, während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung dargebotene, Veränderungen sollten öfter entdeckt werden als irrelevante. Auf relevante entdeckte Veränderungen wiederum sollte schneller reagiert werden als auf irrelevante.

Weiter nahmen wir an, dass Veränderungen mit zunehmender Distanz zum Fixationsort seltener entdeckt werden.

Aus früheren Untersuchungen (Pannasch et al., 2001a; Velichkovsky et al., 2002; Unema et al., im Druck) wissen wir, dass Veränderungen der Situation mit einer phasischen Verlängerung der Fixationsdauer einhergehen (siehe hierzu auch Abschnitt 2.4). Daher nahmen wir in

bezug auf die implizite Entdeckung von Veränderungen an, dass es bei Entdeckung, aber auch bei Nichtentdeckung zu einer Verlängerung der Fixationsdauer zum Zeitpunkt der Darbietung der Veränderung kommt.

Hinsichtlich der Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit nahmen wir an, dass sich die Probanden unmittelbar vor der Nichtentdeckung einer Veränderung auf der ambienten Ebene und unmittelbar vor Entdeckung auf der fokalen Ebene befinden.

4.2.4 Apparatur

Die Registrierung der Augenbewegungen und damit eine gezielte Darbietung des veränderten Bildes während eines Lidschlags, einer Sakkade oder einer Fixation wurde durch die Einbindung einer EyeLink-I Augenbewegungskamera der Firma SR-Research (siehe Abbildung 2.4 A) ermöglicht. Das kopfgestützte videobasierte System zeichnet mittels Infrarot-Pupillenregistrierung Augenbewegungen in einem horizontalen Erfassungswinkel von 32° und einem vertikalen Erfassungswinkel von 24° mit einer zeitlichen Auflösung von 250 Hz und einer räumlichen Auflösung von $0,5^\circ$ auf und verfügt über eine zufriedenstellende Kompensation von Kopfbewegungen. Die Augenbewegungsdaten wurden monocular am dominanten Auge erfasst und von einem EyeLink-Rechner (DOS-Betriebssystem) aufgezeichnet. Während des Versuchs war es möglich, die Blickbewegungen eines Probanden „online“ auf einem Kontrollbildschirm dieses Rechners zu beobachten. Der Datenaustausch zwischen EyeLink-Rechner und dem Rechner, der die Versuchsdarbietung steuerte und mit dem die Kalibrierung der Augenbewegungskamera durchgeführt wurde (Steuerrechner, Windows-Betriebssystem), erfolgte über eine Ethernet-Verbindung. Der Steuerrechner empfing die Augenbewegungsdaten vom EyeLink-Rechner mit einer Verzögerung von etwa 8 ms. Blickbewegungen, mit einer Amplitude von über $0,3^\circ$ wurden innerhalb weiterer 16 ms vom EyeLink-Rechner als Sakkaden erkannt. Fixationen wurden als Abwesenheit von Sakkaden definiert, es sei denn die Verdeckung der Pupille zeigte einen Lidschlag an. Fixationen und Lidschläge wurden genauso schnell „online“ erkannt wie Sakkaden. Die Information, welche Augenbewegungsart vorlag, wurde also mit einer Gesamtverzögerung von 24 ms an den Steuerrechner übertragen. Um ein Flackern des Steuermonitors (17 Zoll), auf dem der Versuch dargeboten wurde, zu vermeiden, wurden die Veränderungen immer zu Beginn des Bildaufbaus dargeboten, so dass bei der Bildwiederholungsrate von 100 Hz eine weitere Verzögerung von 0 ms bis 10 ms entstand. An den Ecken des Steuermonitors befanden sich insgesamt vier Infrarotdioden, die zur Kompensation von Kopfbewegungen mit der Kopfkamera kommunizierten und die Position des Kopfes zum Monitor erfassten. Alle Stimulusdaten (Bild, Art der Veränderung, Ort der Ver-

änderung, Art der Unterbrechung) sowie die Reaktion der Probanden wurden zeitkodiert an den EyeLink-Rechner geleitet und dort in einer Log-Datei mit den entsprechenden Augenbewegungsdaten zur retrospektiven Analyse gespeichert. Die Programmierung der Versuchsanordnung erfolgte mittels der Programmiersprache Delphi.

4.2.5 Versuchsdurchführung

Alle in dieser Arbeit beschriebenen Versuche wurden im Blickbewegungslabor des Instituts für Psychologie III für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie der TU-Dresden durchgeführt. Im Labor waren bei allen Versuchen nur der Versuchsleiter (zum Teil unter Aufsicht des Autors) und die jeweilige Versuchsperson anwesend.

Nach der Begrüßung wurden die Probanden jeweils zu Beginn des Versuchs aufgefordert, einen Fragebogen zur Erhebung von Kovariablen (Alkohol- und Medikamentenkonsum, Schlafdauer, Sehvermögen, Fahrerlaubnis, Computererfahrung) und soziodemographischen Daten auszufüllen. Anschließend wurden sie mit einem Abstand von 60 cm (Auge zu Bildschirmoberfläche) vor dem Monitor des Darbietungsrechners platziert, so dass ihr Sichtwinkel (in bezug auf den Bildschirm) exakt dem Erfassungswinkel der Augenbewegungskamera entsprach. Durch Vorlesen einer standardisierten Instruktion wurden die Probanden aufgefordert, die ihnen im Anschluss dargebotenen Fotos aus der Sicht eines Autofahrers zu betrachten und auf mögliche Veränderungen zu achten. Beim Entdecken einer Veränderung sollten sie dies unmittelbar mit einem Mausklick signalisieren. Von einem gelegentlich kurz auftauchenden grauen Bildschirm (Blank) sollten sie sich nicht stören lassen. In einem Testdurchlauf mit 20 Durchgängen wurden die Probanden mit dem Stimulusmaterial vertraut gemacht. Keine der hierzu verwendeten Veränderungen wurde im Hauptversuch erneut verwendet. Schließlich begann nach Anpassung und Kalibrierung der Augenbewegungskamera der Versuch. Nach jedem fünften Durchgang wurde eine automatische Drift-Korrektur (zur Kompensierung leichter Verschiebungen der Augenbewegungskamera) und alle 30 Durchgänge eine Neukalibrierung der Augenbewegungskamera durchgeführt. Nach 100 und 200 Durchgängen fand eine fünfminütige Pause statt. Inklusive der Pausen dauerte der gesamte Versuch 75 Minuten.

Während der gesamten Versuchsdauer wurden Verhaltensbeobachtungen auf einem Protokollbogen notiert. Nach dem Versuch wurden den Probanden auf Wunsch die Ziele der Untersuchung erläutert.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Datenanalyse

Alle Daten wurden auf mögliche Artefakte überprüft. Einzelne Durchgänge wurden dann von der Analyse ausgeschlossen, wenn eine beabsichtigte Unterbrechung zum Zeitpunkt der Veränderung bereits wieder vorbei war (z.B. wenn eine Sakkade sehr kurz war) oder wenn der Algorithmus zur Erkennung der Unterbrechungsarten (z.B. durch Rauschen) versagte. Wenn ein Lidschlag die beabsichtigte Unterbrechung darstellte und die maximale Wartezeit von 6 s überschritten war, wurde dieser Durchgang aussortiert, um systematische Unterschiede durch die Präsentationsdauer des Ausgangsbildes zu vermeiden. Schließlich wurden fünf Probanden mit weniger als zehn Wahrnehmungen in einer der acht Zellen des experimentellen Designs (Unterbrechungsart und Relevanz) aussortiert, so dass ein finaler Datensatz von 4461 gültigen Durchgängen in die statistische Analyse einging. Mittelwertdifferenzen wurden durch Varianzanalysen (Allgemeines lineares Modell) mit Messwiederholung geprüft. Die Daten wurden hierzu aggregiert. Alle statistischen Analysen, auch die der folgenden in dieser Arbeit dargestellten Experimente, wurden mit Hilfe des statistischen Programmpaketes SPSS 11.0 für Windows durchgeführt.

Der Blank wurde nicht als Hinweisreiz genutzt: Die durchschnittliche Falsche-Alarm-Rate bei den Catch Trials lag bei 5,3% (der höchste Wert eines Probanden lag bei 8,3%). Die durchschnittliche Fixationsdauer betrug 364 ms. Die durchschnittliche Lidschlagrate aller Probanden betrug 14 pro Minute, mit einer mittleren Dauer von 154 ms. Sakkaden wurden ca. 2,5 mal pro Sekunde mit einer Durchschnittsdauer von 30 ms und einer mittleren Amplitude von $4,5^\circ$ initiiert.

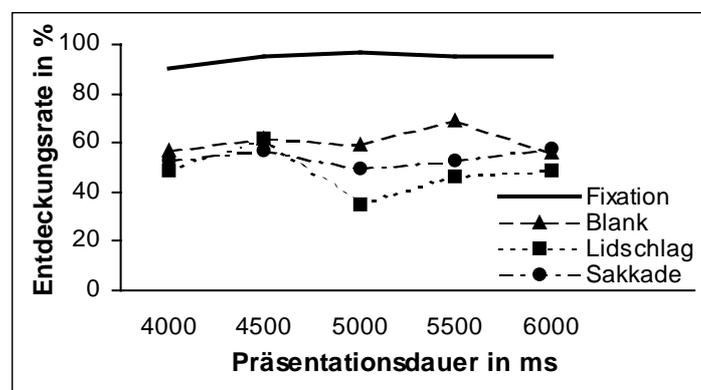


Abbildung 4.2. Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Präsentationsdauer des Ausgangsbildes.

Da das Auftauchen von Sakkaden, Fixationen und insbesondere von Lidschlägen nicht vorhergesagt werden konnte, überprüfen wir, ob unterschiedliche Präsentationsdauern des Ausgangsbildes die Ergebnisse verzerren. Die Präsentationsdauer war die Zeit, die vom Erscheinen des Ausgangsbildes bis zur Initiierung der jeweiligen Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung (Blank, Lidschlag, Sakkade sowie Fixation als Kontrollbedingung) verging. In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass sich Präsentationsdauern zwischen 4 s und 6 s (unterteilt in Klassen von jeweils 500 ms) nicht auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit auswirkten ($F_{4,18} = 1,076$; $p > .3$) und keine Interaktionen mit der Unterbrechungsart vorlag ($F_{7,36} = 0,609$; $p > .7$).

4.3.2 Art der Unterbrechung

Abbildung 4.3 zeigt die Entdeckungswahrscheinlichkeit und die Entdeckungszeit für Veränderungen, die während einer der drei Unterbrechungen der visuellen Wahrnehmung oder während der Kontrollbedingung dargeboten wurden.

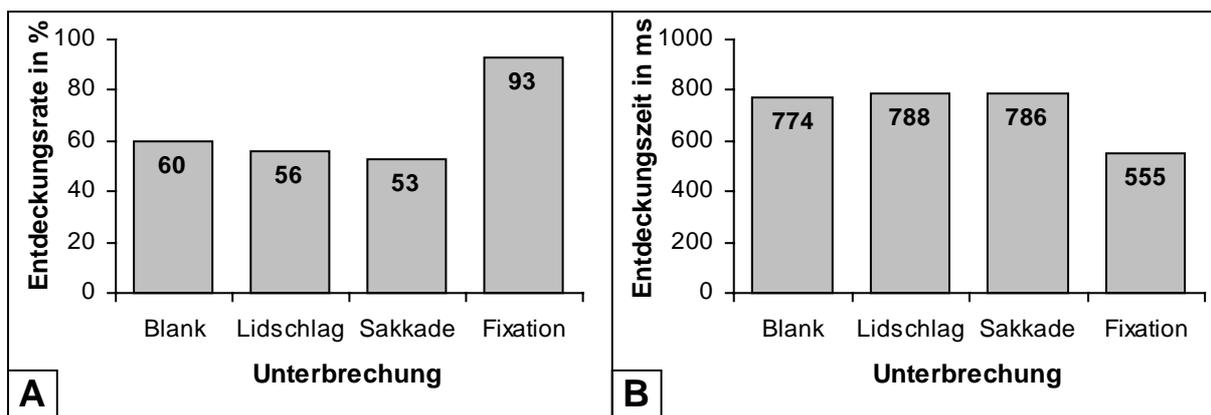


Abbildung 4.3. (A) Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Unterbrechungsart (B) Entdeckungszeit nach Unterbrechungsart.

Hinsichtlich der Entdeckungswahrscheinlichkeit (Abbildung 4.3 A) zeigte sich kein Unterschied zwischen den drei Unterbrechungsarten ($F_{2,18} = 1.371$; $p > .2$). Veränderungen, die während einer Unterbrechung dargeboten wurden, wurden jedoch in allen drei Bedingungen deutlich (durchschnittlich zu 37%) seltener entdeckt als in der Fixationsbedingung (alle Vergleiche: $p < .001$): Es zeigten sich Effekte klassischer Veränderungsblindheit.

Auch die Entdeckungszeiten für die entdeckten Veränderungen (Abbildung 4.3 B) unterschieden sich bei Blanks, Lidschlägen und Sakkaden nicht ($F_{2,18} = 3.997$; $p > .1$). Von der Kontrollbedingung unterschieden sie sich auch hier (mit durchschnittlich 228 ms) deutlich (alle Vergleiche: $p < .001$).

4.3.3 Relevanz

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit (A) und die Entdeckungszeit (B) für relevante und irrelevante Veränderungen sind in Abbildung 4.4 dargestellt, jeweils für die einzelnen Unterbrechungsarten und die Fixationsbedingung.

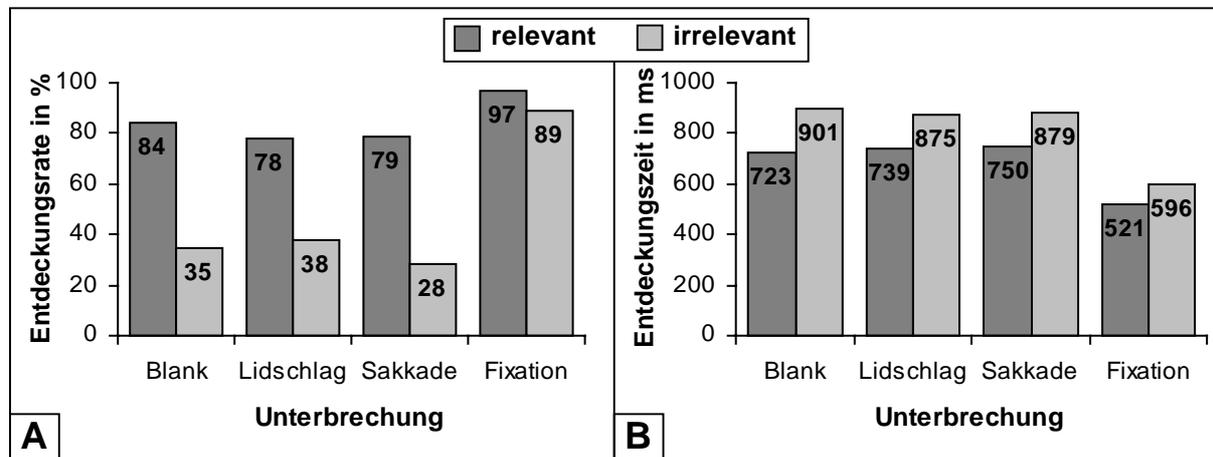


Abbildung 4.4. (A) Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Unterbrechungsart und Relevanz (B) Entdeckungszeit nach Unterbrechungsart und Relevanz.

Es zeigte sich, dass während einer Unterbrechung dargebotene relevante Veränderungen deutlich (durchschnittlich 46%) häufiger ($F_{1,18} = 360.32$; $p < .001$) und (durchschnittlich 150 ms) schneller ($F_{1,18} = 6.32$; $p < .013$) entdeckt wurden als irrelevante Veränderungen. Dieser Relevanz-Effekt zeigte sich in allen Unterbrechungsbedingungen, sowohl bei der Entdeckungswahrscheinlichkeit (alle Vergleiche: $p < .002$) als auch bei der Entdeckungszeit (alle Vergleiche: $p < .002$). Im Vergleich zur Fixationsbedingung wurden die relevanten Veränderungen in allen Unterbrechungsbedingungen (durchschnittlich zu 17%) seltener entdeckt (alle Vergleiche: $p < .001$). Zwischen den einzelnen Unterbrechungsarten zeigten sich keine Unterschiede (alle Vergleiche: $p > .5$).

Die entdeckten relevanten Veränderungen wurden in den Unterbrechungsbedingungen insgesamt durchschnittlich 220 ms langsamer entdeckt als in der Fixationsbedingung (alle Vergleiche: $p < .001$). Zwischen den einzelnen Unterbrechungsbedingungen zeigte sich auch hinsichtlich der Entdeckungszeit kein Unterschied (alle Vergleiche: $p > .8$). Bei den irrelevanten Veränderungen zeigte sich ein analoges Bild: Bezüglich der Entdeckungswahrscheinlichkeit (alle Vergleiche: $p < .001$) und der Entdeckungszeit (alle Vergleiche: $p < .001$) zeigten sich in allen Unterbrechungsbedingungen Unterschiede zur Fixationsbedingung. Zwischen den einzelnen Unterbrechungsbedingungen zeigten sich keine Unterschiede (alle Vergleiche: $p > .1$).

4.3.4 Art der Veränderung

Wir analysierten die Daten zusätzlich hinsichtlich der zwei häufigsten Arten der Veränderung: Subtraktionen und Additionen. Obwohl diese Stufung im eigentlichen Versuchsdesign nicht vorgesehen war, stellen wir die interessanten und aufgrund ausreichender Daten statistisch prüfbareren Ergebnisse dennoch dar. Abbildung 4.5 zeigt die Entdeckungsrate (A) und die Entdeckungszeit (B) nur für relevante Additionen und Subtraktionen, jeweils für die einzelnen Unterbrechungsarten und die Fixationsbedingung.

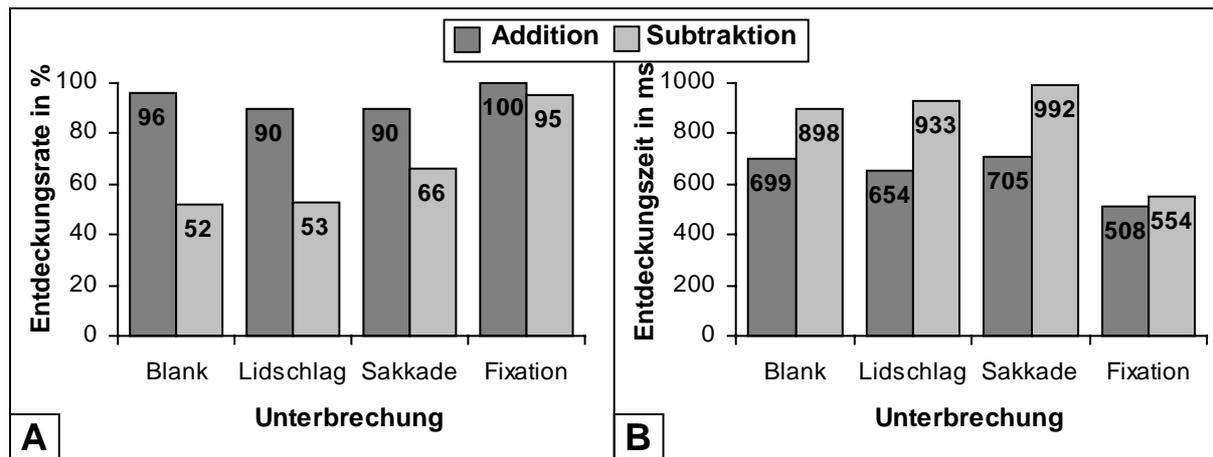


Abbildung 4.5. Relevante Veränderungen. (A) Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Unterbrechungsart und Art der Veränderung (B) Entdeckungszeit nach Unterbrechungsart und Art der Veränderung.

In allen Unterbrechungsbedingungen wurden Additionen, mit einer Rate von mindestens 90%, besser entdeckt als Subtraktionen (alle Vergleiche: $p < .001$). Die Unterbrechungsarten unterschieden sich nicht voneinander, weder bei den Subtraktionen, noch bei den Additionen (alle Vergleiche: $p > .9$). Im Vergleich zur Fixationsbedingung wurden Additionen ($F_{3,18} = 8,668$; $p < .001$) und Subtraktionen ($F_{3,18} = 9,130$; $p < .001$), die während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung dargeboten wurden, durchschnittlich seltener entdeckt (Addition zu 8%; Subtraktion zu 38%).

Additionen wurden in allen Unterbrechungsbedingungen schneller entdeckt als Subtraktionen (alle Vergleiche: $p < .001$). Zwischen den Unterbrechungsarten zeigten sich, für beide Arten der Veränderung, keine Unterschiede (alle Vergleiche: $p > .2$) hinsichtlich der Entdeckungszeit. Im Vergleich zur Fixationsbedingung wurden Additionen ($F_{3,18} = 19,905$; $p < .001$) und Subtraktionen ($F_{3,18} = 16,919$; $p < .001$), die während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung dargeboten wurden, durchschnittlich später entdeckt (Addition: 180 ms; Subtraktion: 390 ms).

Bei irrelevanten Veränderungen zeigten sich, abgesehen vom allgemeinen Relevanzeffekt, analoge Effekte.

4.3.5 Foveale Distanz

Da eine Veränderung mit zunehmender Distanz zum Fixationsort unschärfer und farbloser auf der Retina abgebildet wird, kann eine schlechtere Entdeckungsleistung auf diese geringere visuelle Auflösung in der Peripherie zurückzuführen sein. Um diesbezüglich Informationen zu gewinnen, betrachteten wir die foveale Distanz zum Zeitpunkt der Darbietung einer Veränderung. Genauer legten wir die Distanz des Mittelpunktes der Fovea zum Mittelpunkt der Veränderung zu dem Zeitpunkt fest, an dem eine Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung beendet war. Die Distanz unterteilten wir in zehn Kategorien (1° bis 10°). Da wir diese Parameter „post hoc“ festlegten, sind die Wahrnehmungen pro Distanz-Kategorie nicht für alle Probanden gleichverteilt, so dass eine statistische Analyse keine sicheren Ergebnisse liefert. Dennoch beschreiben wir im Folgenden einige Tendenzen. So zeigt Abbildung 4.6 A, dass relevante Veränderungen (mit und ohne Unterbrechung) über einen Bereich von 0° bis 10° überwiegend unabhängig von der Distanz der Veränderung zum Fixationsort entdeckt werden.

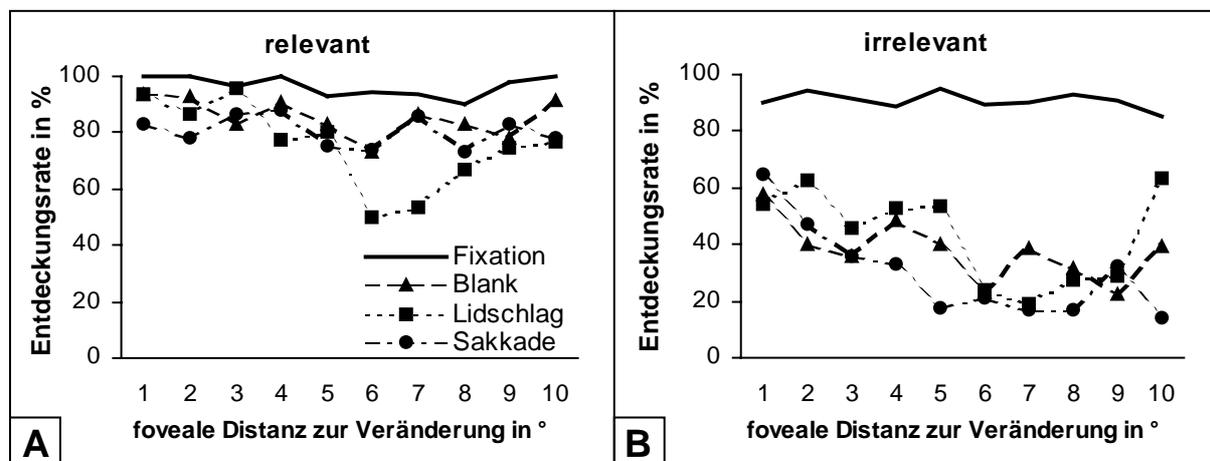


Abbildung 4.6. Entdeckungsrate nach fovealer Distanz und Unterbrechungsart. (A) relevante Veränderungen (B) irrelevante Veränderungen.

Bei den irrelevanten Veränderungen (Abbildung 4.6 B) ist die Entdeckung ohne Unterbrechung, also während einer Fixation, ähnlich unabhängig von der fovealen Distanz. Findet die Veränderung jedoch während eines Blanks, eines Lidschlages oder einer Sakkade statt, deutet sich dann ein Vorteil an, wenn die Veränderung nach der Unterbrechung (para)foveal, d.h. bis zu 4° Abweichung, fixiert wird.

Abbildung 4.7 zeigt die Entdeckungsrate bei Subtraktionen und Additionen für die einzelnen Unterbrechungsarten zum Zeitpunkt der Veränderung, bis zu 10° fovealer Distanz zum Veränderungsart.

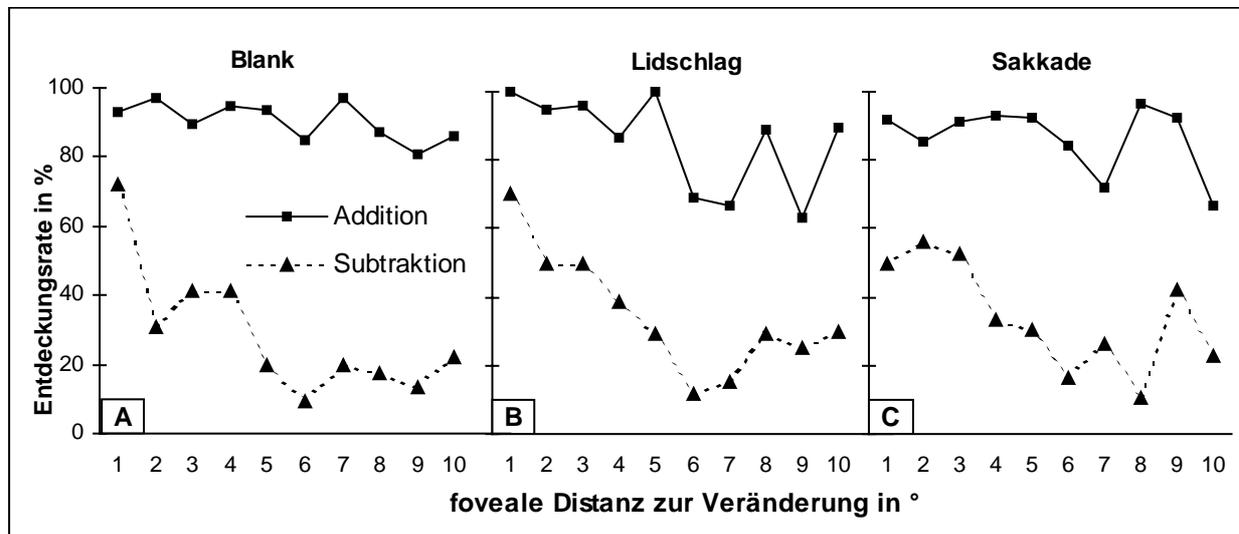


Abbildung 4.7. Entdeckungsrate nach fovealer Distanz und Art der Veränderung. (A) Blank-Bedingung (B) Lidschlagbedingung (C) Sakkadenbedingung.

Während Additionen über einen großen Bereich der fovealen Distanz überwiegend gleich gut entdeckt werden, zeigt sich bei Subtraktionen, dass sich die Entdeckung mit zunehmender fovealer Distanz vergleichsweise verschlechtert.

4.3.6 Implizite Entdeckung

Wir betrachteten die phasischen Fixationsdauern (vgl. Abschnitt 2.4) um den Zeitpunkt des Auftretens der Veränderung – bei explizit wahrgenommenen und bei nicht (womöglich aber implizit) wahrgenommenen Veränderungen. Hierbei berücksichtigten wir aus folgenden Gründen Veränderungen nicht, die während Blanks oder Lidschlägen auftraten: Bei Veränderungen während eines Blanks wirkt dieser als Distraktor und führt daher zu einer künstlichen Verlängerung der aktuellen Fixation. Bei Veränderungen während eines Lidschlages lässt sich nicht sicher feststellen, ob dieser eine Fixation unterbrochen hat oder nicht, d.h. eine kurze Fixation jeweils vor und nach einem Lidschlag könnte auch eine längere, durch den Lidschlag unterbrochene, sein.

Abbildung 4.8 zeigt die phasischen Fixationsdauern um das Auftreten der Veränderung für die Fixationsbedingung (A) und die Sakkadenbedingung (B) bei explizit entdeckten und nicht entdeckten Veränderungen.

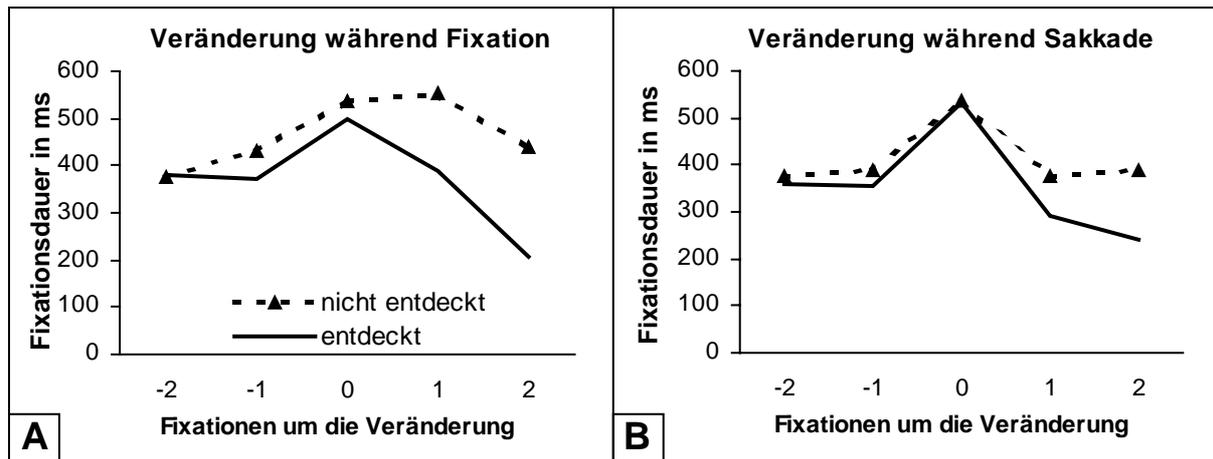


Abbildung 4.8. Phasische Fixationsdauern für entdeckte und nicht entdeckte Veränderungen um den Zeitpunkt der Veränderung. (A) Fixationsbedingung (B) Sakkadenbedingung.

Der Nullpunkt markiert in der Sakkadenbedingung die erste Fixation nach der Sakkade, während der die Veränderung dargeboten wurde und in der Fixationsbedingung die Fixation, während der die Veränderung stattfand. Zum Vergleich wurden die zwei vorangehenden und die zwei nachfolgenden Fixationen, während derer kein Ereignis stattfand, herangezogen.

Veränderungen, die während einer Fixation dargeboten wurden, führten zu einer deutlichen Verlängerung dieser Fixationsdauer (0), verglichen mit den Dauern der beiden vorangehenden Fixationen (-2, -1). Diese spezifische Verlängerung zeigte sich sowohl bei Entdeckung ($F_{2,18} = 33,650$; $p < .001$) als auch bei Nichtentdeckung ($F_{2,18} = 7,085$; $p < .004$) einer Veränderung und unterschied sich in beiden Bedingungen nicht ($F_{1,18} = 0,770$; $p > .3$). Bei Veränderungen, die während einer Sakkade dargeboten wurden, kam es zu einer entsprechenden Verlängerung der Dauer der, dieser Sakkade folgenden, Fixation – wieder gleichermaßen ($F_{1,18} = 0,028$; $p > .8$) bei Entdeckung ($F_{2,18} = 17,656$; $p < .001$) und Nichtentdeckung ($F_{2,18} = 22,312$; $p < .001$).

Nachdem die Veränderung entdeckt wurde, zeigte sich sowohl bei der Fixations- ($F_{2,18} = 91,998$; $p < .001$) als auch bei der Sakkadenbedingung ($F_{2,18} = 50,802$; $p < .001$) ein deutlicher Abfall der, der Veränderung folgenden, Fixationsdauern (+1, +2), verglichen mit der Fixationsdauer zum Zeitpunkt der Veränderung (0). Bei nicht entdeckten Veränderungen zeigte sich in der Fixationsbedingung kein entsprechender Abfall ($F_{2,18} = 1,844$; $p > .1$), obwohl sich ein solcher „verzögert“ andeutet. In der Sakkadenbedingung hingegen kam es auch bei den nicht entdeckten Veränderungen zu einem deutlichen Absinken der Fixationsdauern ($F_{2,18} = 16,862$; $p < .001$). Ein Vergleich der beiden Verläufe (0, +1, +2; Entdeckung vs. Nichtentdeckung) zeigt, dass nach entdeckten Veränderungen, sowohl für die Fixationsbedingung ($F_{3,36} = 4,063$;

$p < .03$) als auch für die Sakkadenbedingung ($F_{3,36} = 4,026$; $p < .03$), die phasischen Fixationsdauern stärker abfallen als nach nicht entdeckten Veränderungen.

4.3.7 Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit

Beim Betrachten einer neuen visuellen Szene werden Objekte zuerst auf einer ambienten Ebene lokalisiert und anschließend auf einer fokalen Ebene identifiziert. Um das Trennungskriterium für die beiden Ebenen festzulegen, analysierten wir, entsprechend der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Vorgehensweise, das Verhältnis von Fixationsdauern und Sakkadenamplituden. Ambiente Fixationen wiesen hier eine Länge von 80 ms bis 330 ms auf und gingen Sakkaden mit einer Amplitude über $4,5^\circ$ voraus. Diese Sakkadenamplitude ist abhängig von der räumlichen Dichteverteilung der Objekte auf den dargebotenen Bildern. Sie würde sich erhöhen, wenn Objekte weiter auseinanderliegen, da so größere Sakkaden nötig wären, um die einzelnen Objekte in der ambienten Phase auf dem Bild zu lokalisieren. Uns interessierte, auf welcher Ebene sich die Probanden unmittelbar vor Entdeckung oder Nichtentdeckung einer Veränderung befinden. Daher betrachteten wir diesbezüglich die relative Häufigkeitsverteilung ambienter und fokaler Fixationen vor dem Auftreten der Veränderung - für die Fixationsbedingung (Abbildung 4.9 A) und die Sakkadenbedingung (Abbildung 4.9 B). Entsprechend der Darstellung in Abschnitt 4.3.6 stellt der Nullpunkt auch hier den Zeitpunkt des Auftauchens einer Veränderung dar. Um Artefakte zu vermeiden, wurden Blank- und Lidschlagbedingung erneut vernachlässigt.

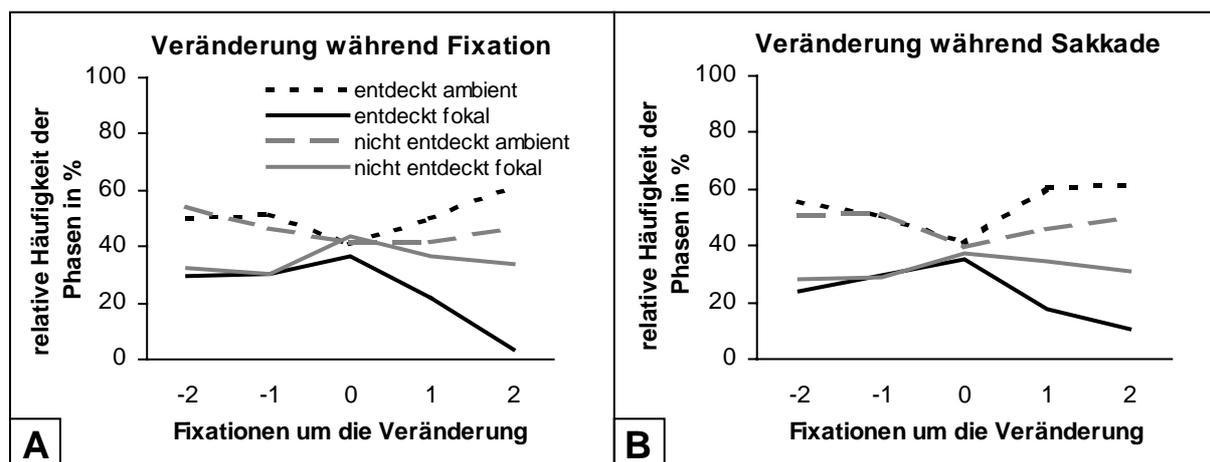


Abbildung 4.9. Relative Häufigkeitsverteilung ambienter und fokaler Fixationen. (A) um Veränderungen während Fixationen (B) um Veränderungen während Sakkaden.

Bei Veränderungen, die während einer Fixation dargeboten und entdeckt wurden, befanden sich die Probanden unmittelbar vor der Veränderung (-2, -1) deutlich häufiger ($F_{1,18} = 12,064$; $p < .002$) auf der ambienten (51%) als auf der fokalen Ebene (30%). Auch vor nichtentdeckten

Veränderungen zeigte sich dieser Vorteil ($F_{1,18} = 7,760$; $p < .02$) für die ambiente (50%) gegenüber der fokalen Ebene (31%). Bei Veränderungen, die während einer Sakkade dargeboten wurden, befanden sich die Probanden ebenfalls unmittelbar vor der entdeckten Veränderung ($F_{1,18} = 19,135$; $p < .001$) oder der nichtentdeckten Veränderung ($F_{1,18} = 10,094$; $p < .006$) häufiger auf der ambienten Ebene der visuellen Aufmerksamkeit (entdeckt: 53% zu 27%; nicht entdeckt: 51% zu 29%).

4.4 Zusammenfassende Diskussion

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen erwartungsgemäß klassische Untersuchungen, die zeigten, dass sich Veränderungsblindheit durch natürliche Sakkaden (Grimes, 1996) und Lid-schläge (O'Regan et al., 2000), aber auch durch künstliche Blanks (Rensink et al., 1997) erzeugen lässt. Dies unterstreicht zum einen die Robustheit des Effektes und zum anderen, dass es sich dabei nicht um ein experimentelles Artefakt handelt. Stattdessen zeigen die Ergebnisse Schwachstellen von Mechanismen auf, die wir für das alltägliche Sehen benötigen. Der Effekt der klassischen Veränderungsblindheit spiegelte sich auch, wie von uns angenommen, in der verzögerten Entdeckungszeit der entdeckten Veränderungen wieder.

Weiterhin bestätigte sich unsere Annahme hinsichtlich der einzelnen Unterbrechungsarten. Wir konnten erstmals zeigen, dass diese sich hinsichtlich der Entdeckungswahrscheinlichkeit und der Entdeckungszeit nicht unterscheiden, unabhängig von der Relevanz, von der Art der Veränderung und von der Präsentationsdauer des Anfangsbildes. Dies widerspricht den Ergebnissen von Blackmore et al. (1995) und Shore & Klein (2000), die jeweils von Unterschieden zwischen Sakkaden und Blanks berichten. Der Blank-Vorteil bei Blackmore et al. (1995) ist weniger auf deren etwa doppelt so lange Blank-Dauer (250 ms), sondern eher auf deren spezifische Sakkadenbedingung zurückzuführen (siehe hierzu Abschnitt 3.1). Dies ließe sich einzig durch einen direkten Vergleich ihrer künstlich provozierten mit unseren natürlichen, also ökologisch valideren, Sakkaden aufklären. Die Untersuchung von Shore & Klein (2000) wiederum ist in keiner Weise mit unserem methodischen Vorgehen zu vergleichen. Erstens könnte der von ihnen gefundene Blank-Vorteil, der sich ohnehin lediglich auf kopfstehende Veränderungen mit zentralem Interesse beschränkt, auf die spezifischen Bedingungen des von ihnen verwendeten unnatürlicheren Flicker-Paradigmas zurückzuführen sein. Zweitens handelt es sich in ihrer „Sakkadenbedingung“ um eine Untersuchung zur Unterschiedsblindheit, da nach Unterschieden in zwei übereinander dargebotenen Bildern gesucht wurde. Die Entdeckung von Unterschieden und die Entdeckung von Veränderungen stellen aber zwei

grundverschiedene Aktivitäten dar (Rensink, 2002). Bezüglich der Unterbrechungsart kommen wir daher zu dem Schluss, dass sich der künstliche Blank mit einer Dauer von 112 ms, zumindest in einer statischen Bedingung und unter Verwendung des One-Shot-Paradigmas, gut zur Simulation von Lidschlägen und Sakkaden eignet und somit einfachere Versuchsdesigns rechtfertigt.

Bezüglich der Relevanz zeigte sich erwartungsgemäß, dass verkehrsrelevante Veränderungen, die während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung dargeboten wurden, besser entdeckt wurden als verkehrsirrelevante. Dennoch wurde jede fünfte relevante Veränderung übersehen. Wie bereits erwähnt ist die Sicht zu etwa 18% der (wachen) Zeit allein durch Lidschläge und Sakkaden unterbrochen. Wenn nun nach diesen Unterbrechungen jede fünfte relevante Veränderung nicht entdeckt wird, bedeutet dies, dass jede 28. relevante Gefahr übersehen wird. Dies ist übertragen auf den Straßenverkehr ein beunruhigendes Ergebnis. Verdeckte verkehrsrelevante Veränderungen wurden, wie erwartet, auch schneller entdeckt als verkehrsirrelevante. Verglichen mit der Fixationsbedingung dauerte eine Entdeckung verdeckter verkehrsrelevanter Veränderungen dennoch 220 ms länger. Übertragen auf den Straßenverkehr wiederum, würde ein Fahrer bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h ohne kurze Unterbrechung seiner Sicht etwa 9 m zurücklegen, bevor er entdeckt, dass sich etwas Relevantes geändert hat und er entsprechende Reaktionen vorbereiten kann. Findet eine Veränderung jedoch z.B. während eines Lidschlages oder einer Sakkade statt, würde der Fahrer weitere (womöglich entscheidende) 3 m bis zur Entdeckung benötigen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die gefährlicheren verkehrsrelevanten Veränderungen in der Regel solche sind, die auftauchen. Eine weiterführende Auswertung der Art der Veränderung zeigte, dass solche Veränderungen fast immer, auch bei zunehmender Entfernung vom aktuellen Fixationsort, entdeckt wurden. Dennoch blieb im Falle einer Entdeckung auch hier eine beunruhigende Latenz von 180 ms. Insgesamt wurden Additionen deutlich häufiger und schneller entdeckt als Subtraktionen. Da Additionen, wie erwähnt, im Straßenverkehr die gefährlicheren (und realistischeren) Gefahren darstellen, führen wir diesen Vorteil auf einen „verborgenen“ Relevanzeffekt zurück, was auch einige der Widersprüche in bisherigen Untersuchungen erklären könnte.

Im Einklang mit O'Regan et al. (2000) fanden wir, dass Veränderungen, die während eines Lidschlags dargeboten wurden, gut im fovealen Bereich entdeckt wurden. Selbiges fanden wir darüber hinaus für Veränderungen, die während Blanks und Sakkaden stattfanden. Hinweise auf die von O'Regan et al. (2000) gefundene und von uns prognostizierte Verschlechterung

der Entdeckung mit zunehmender Distanz zum Fixationsort fanden wir (ohne statistische Absicherung) jedoch nur bei irrelevanten Veränderungen. Relevante Veränderungen wurden im (para)fovealen und peripheren Bereich (bis 10°) gleich gut entdeckt. Wir führen die Unterschiede zu O'Regan et al. (2000) weniger auf die unterschiedlichen experimentellen Paradigmen (Flicker vs. One-Shot) als auf den inhaltlich nicht zu vergleichenden Relevanzbegriff zurück. Womöglich führt eine stärkere Trennung (verkehrsbezogene Relevanz vs. Irrelevanz statt allgemeines zentrales vs. marginales Interesse) auch zu einer erhöhten Bereitschaft, relevante Veränderungen auch außerhalb des fovealen Bereichs zu entdecken. Bei einer weiterführenden Betrachtung der Art der Veränderung fiel zusätzlich auf, dass sich die Entdeckung mit zunehmender fovealer Distanz bei Additionen, im Gegensatz zu Subtraktionen, nicht verschlechtert. Die im Verkehr wichtigsten Veränderungen – also relevante Additionen – werden nicht nur am häufigsten und schnellsten, sondern auch über das Gesichtsfeld (zumindest bis 10° Exzentrizität) am besten entdeckt.

Entsprechend unserer Annahme fanden wir, wie Hayhoe (2000) und Hollingworth et al. (2001), Anzeichen für eine implizite Veränderungswahrnehmung in der Fixationsdauer. Nicht nur entdeckte, sondern auch nicht entdeckte Veränderungen gingen, sowohl in der unentdeckten Fixationsbedingung als auch in der Sakkadenbedingung, mit einer deutlichen Verlängerung der phasischen Fixationsdauer einher. Zwar ist diese Verlängerung zum Zeitpunkt des Auftauchens der Veränderung (genauer: unmittelbar danach) bei Nichtentdeckung ausreichend, um eine implizite Entdeckung der Veränderung zu vermuten, zwischen einer expliziten Entdeckung und einer impliziten Entdeckung trennt sie jedoch nicht. Eine zusätzliche Betrachtung der Verläufe der phasischen Fixationsdauern nach der expliziten und impliziten „Entdeckung“ legt eine derartige Differenzierung nah: Es zeigte sich, dass die Dauer der beiden nachfolgenden Fixationen, nach entdeckten Veränderungen stärker abfällt als nach nicht (explizit) entdeckten. Womöglich spiegeln die vergleichsweise langen Fixationen nach der impliziten Entdeckung einen Zustand der Bereitschaft zur Reaktion wieder (ähnlich einer verlängerten Orientierungsreaktion; Sokolov, 1963), der „nach erledigter Aufgabe“ bei den explizit entdeckten Veränderungen nicht notwendig ist.

Hinsichtlich der Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit wurden unsere Annahmen nicht bestätigt. Die Probanden befanden sich in beiden analysierten Versuchsbedingungen (Fixations- und Sakkadenbedingung) sowohl unmittelbar vor der Nichtentdeckung als auch unmittelbar vor der Entdeckung deutlich häufiger auf der ambienten Ebene der visuellen Aufmerksamkeit. Den Grund hierfür sehen wir in der Art der Instruktion, die wir zugunsten ihrer Natürlichkeit für das Experiment wählten - der einfachen Entdeckung. Sie trennt nicht zwischen lokalisier-

ten und identifizierten entdeckten Veränderungen. Angesichts des deutlichen Vorteils für die ambiente Ebene bei Entdeckung und der Tatsache, dass die Probanden „so schnell wie möglich“ reagieren sollten, ist es sehr wahrscheinlich, dass die überwiegende Mehrheit bereits bei einer Lokalisierung einer Veränderung (auf der ambienten Ebene) reagierte und nicht bis zu einer Identifizierung (auf der fokalen Ebene) wartete. Im Rahmen von Rensinks Kohärenz Theorie (2000b, 2002) würden die Veränderungen also mit den nicht- oder voraufmerksamen Systemen 1 (frühes Sehen) und 3 (Umgebung) entdeckt. Eindeutig ließe sich dies jedoch einzig mit einer experimentellen Trennung von Lokalisation und Identifikation untersuchen.

Insgesamt führen uns die Ergebnisse zu dem Schluss, dass Veränderungsblindheit, unabhängig von der Unterbrechungsart, ein Grund für zu späte oder nicht erkannte Gefahren im Straßenverkehr sein kann, wenngleich sie für die gefährlichsten Situationen deutlich geringer ausfällt.

5 Experiment 2: Variation der Unterbrechungsart in virtueller dynamischer Umgebung

5.1 Einleitung

Die Ergebnisse aus Experiment 1 wurden ausschließlich in einer statischen Umgebung gewonnen und lassen sich daher mangels ökologischer Validität nicht ohne weiteres auf den Straßenverkehr übertragen. Daher führten wir eine Folgeuntersuchung in dynamischer Umgebung durch. Es interessierte uns, inwieweit die tatsächlich gefährlichsten Situationen, also auftauchende verkehrsrelevante Veränderungen, in einer dynamischen Umgebung Veränderungsblindheit erzeugen, wenn sie während eines Blanks dargeboten werden. Auch die Parameter Fixationsort, Fixationsdauer und Sakkadenamplitude und ihr Zusammenhang mit der (expliziten und impliziten) Wahrnehmung von Veränderungen sowie die Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit (ambient vs. fokal) vor der (Nicht-)Entdeckung einer Veränderung sollten erneut in dynamischer Umgebung untersucht werden.

5.2 Methode

5.2.1 Probanden

Zwölf Versuchspersonen (6 weibliche und 6 männliche, im Alter von 19 bis 31 Jahren) wurden aus dem Bekanntenkreis des Versuchsleiters und über Aushänge rekrutiert. Alle Probanden verfügten über normales oder entsprechend korrigiertes Sehvermögen, waren im Besitz einer Fahrerlaubnis, standen nicht unter Alkohol- oder Medikamenteneinfluss und waren motiviert, konzentriert und wach. Für die Teilnahme erhielten sie entweder eine Versuchspersonenstunde oder 5 Euro. An Experiment 1 oder einer anderen Untersuchung zur Veränderungsblindheit hatten sie zuvor nicht teilgenommen.

5.2.2 Stimuli und Versuchsdesign

Das während einer simulierten Stadtfahrt dargebotene Stimulusmaterial bestand aus insgesamt 50 verschiedenen Veränderungen, z.B. Tieren, Personen oder Verkehrszeichen. Für die Veränderungen und die übrige Simulationsumgebung dienten Fotos als Vorlage. Alle Veränderungen waren verkehrsrelevante Additionen und gehörten damit der Kategorie an, die in Experiment 1 am besten entdeckt wurde. Als zweifach gestufte unabhängige Variable fungierte die *Unterbrechungsart*: Die Veränderungen tauchten entweder während eines *Blanks*

(ca. 150 ms Dauer) oder während einer *Fixation* (Kontrollbedingung) auf. In der Blank-Bedingung wurden erneut Catch Trials dargeboten, um Rateeffekte zu kontrollieren. Abbildung 5.1 illustriert am Beispiel zweier Standbilder eine im Experiment verwendete Veränderung.

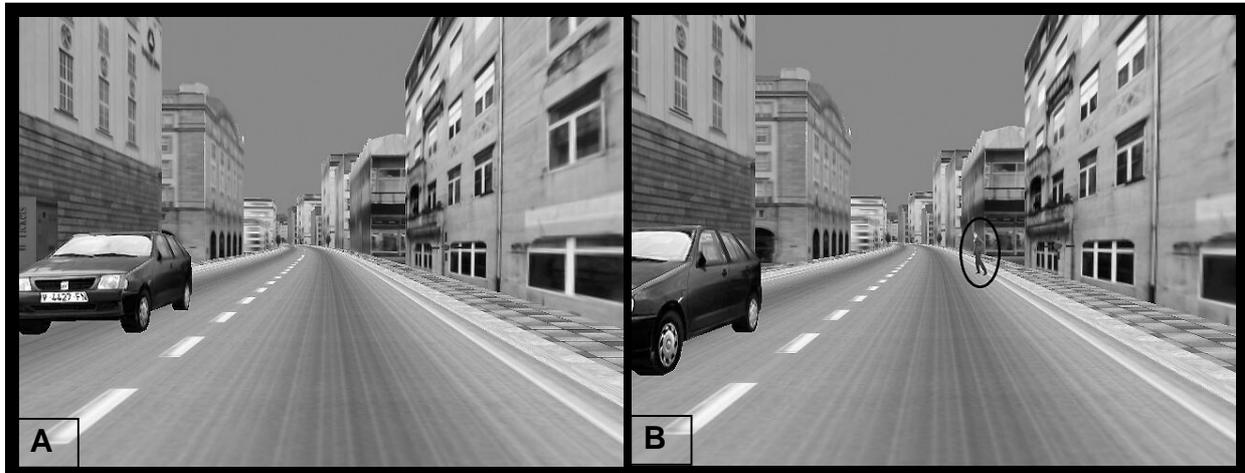


Abbildung 5.1. Standbilder aus Experiment 2. (A) vor einem Blank (B) nach einem Blank: Ein Fußgänger taucht rechts auf der Fahrspur auf.

Um für alle Probanden eine Entdeckungszeit von exakt 2 s zu ermöglichen, wurde eine Veränderung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargeboten, d.h. bei höherer Fahrgeschwindigkeit tauchte die Veränderung weiter entfernt auf und umgekehrt. Entdeckte Veränderungen verschwanden zum Zeitpunkt der Entdeckung von der Straße. Es folgte eine Zeitspanne von 8 s, in der nichts geschah, gefolgt von einem Intervall von 10 s, in dem zu einem zufälligen Zeitpunkt die nächste Veränderung auftauchte. Größe und Farbe wurden über alle Veränderungen hinweg ausbalanciert. Da in der Realität (bei Rechtsverkehr) relevante Veränderungen häufiger rechts stattfinden, tauchten Objekte in der Simulation häufiger (zu 65%) auf der rechten Fahrspur auf.

Die ursprünglich geplante gezielte Darbietung der Veränderungen während der natürlichen Unterbrechungen (zum erneuten Vergleich der einzelnen Unterbrechungsarten) ließ die Framerate (18 Hz bis 25 Hz) des Fahrstimulators nicht zu. Eine Sakkade z.B. wäre bei Darbietung der Veränderung mit dem nächsten generierbaren Bild (nach bis zu 60 ms) häufig bereits vorüber. Die Information, welche Augenbewegungsart vorlag, wäre mit einer weiteren Verzögerung (z.T. über 50 ms) über den Steuerrechner an den Simulatorrechner übertragen worden, so dass auch eine gezielte Darbietung während Lidschlägen nicht zu realisieren war. Um dennoch Informationen zu augenbewegungskontingenten Veränderungen zu gewinnen, erhöhten wir die Wahrscheinlichkeit, dass Veränderungen zufällig während eines Lidschlags oder eine

Sakkade stattfinden. Dazu absolvierten die Probanden eine längere Fahrt als für die Manipulation der eigentlichen experimentellen Bedingungen „Blank“ und „Fixation“ notwendig.

Abhängige Variablen waren wie in Experiment 1 *Entdeckungswahrscheinlichkeit* und *Entdeckungszeit* sowie *Sakkadenamplitude*, *Fixationsdauer* und *Fixationsort*. Den Nullpunkt für die Messung der Entdeckungszeit stellte wie in Experiment 1 der Zeitpunkt dar, in dem eine Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung zu Ende war (siehe auch Abschnitt 4.2.2).

5.2.3 Hypothesen

In dieser explorativen Untersuchung hatten wir folgende theoretisch begründete Annahmen:

Davon ausgehend, dass die Entdeckung einer Veränderung in dynamischen Umgebungen (verglichen mit statischen), aufgrund der erhöhten Informationsverarbeitung, schwieriger ist und unter Berücksichtigung der oben besprochenen Literatur, erwarteten wir (trotz der guten Entdeckungsrate entsprechender Veränderungen in Experiment 1) einen Effekt der klassischen Veränderungsblindheit, also eine geringere Entdeckungsrate bei Veränderungen, die während einem Blank auftauchen, verglichen mit der unverdeckten Fixationsbedingung. Auch sollten entdeckte Veränderungen in der Blank-Bedingung später entdeckt werden als in der Kontrollbedingung. Unter Vorbehalt (wegen der zu erwartenden zu geringen sakkaden- und lidschlagkontingenten Veränderungen, die eine statistische Auswertung erschweren oder verhindern) nahmen wir erneut an, dass sich die Entdeckungsrate und die Entdeckungszeit bei den einzelnen Unterbrechungsarten (Lidschlag, Sakkade und Blank) nicht unterscheiden.

Die Ergebnisse aus Experiment 1 berücksichtigend, nahmen wir hinsichtlich der fovealen Distanz an, dass Veränderungen mit zunehmender Distanz zum Fixationsort (bis 10°) im Allgemeinen nicht schlechter entdeckt werden.

In bezug auf die implizite Entdeckung von Veränderungen erwarteten wir bei Entdeckung und Nichtentdeckung wieder eine Verlängerung der Fixationsdauer zum Zeitpunkt des Auftauchens der Veränderung.

Da die Probanden, wie in Experiment 1, instruiert wurden, eine einfache Entdeckungsaufgabe zu bearbeiten, nahmen wir hinsichtlich der Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit trotz der komplexeren dynamischen Umgebung an, dass sich die Probanden sowohl unmittelbar vor der Entdeckung als auch unmittelbar vor der Nichtentdeckung einer Veränderung auf der ambienten Ebene der Aufmerksamkeit befinden.

5.2.4 Apparatur

Zur Registrierung der Augenbewegungen fand erneut das in Abschnitt 4.2.4 beschriebene EyeLink-I System Verwendung. Als Fahrsimulator diente das von der ARTEC-Gruppe an der Universität von Valencia entwickelte „SIRCA“ – System, das bereits erfolgreich am Nissan Cambridge Basic Research-Center in den USA eingesetzt wurde. Ursprünglich wurde der „SIRCA“- Simulator für Silicon Graphics Workstations (SGI) entwickelt. Es gelang uns jedoch, ihn ohne Leistungseinbußen auf ein kostengünstigeres Linux Red Hat-System zu portieren. Die Auflösung des in Echtzeit dargebotenen Simulatorbildes betrug 1280 x 1024 Pixel, bei einer Framerate von 18 Hz bis 25 Hz. Der Simulator wurde durch die Einbindung der Augenbewegungskamera weiterentwickelt und an unsere experimentellen Bedürfnisse angepasst. Das so entstandene Fahrsimulator-System basierte auf drei, über Ethernet miteinander verbundenen Rechnern (vgl. hierzu Abbildung 5.2 A).

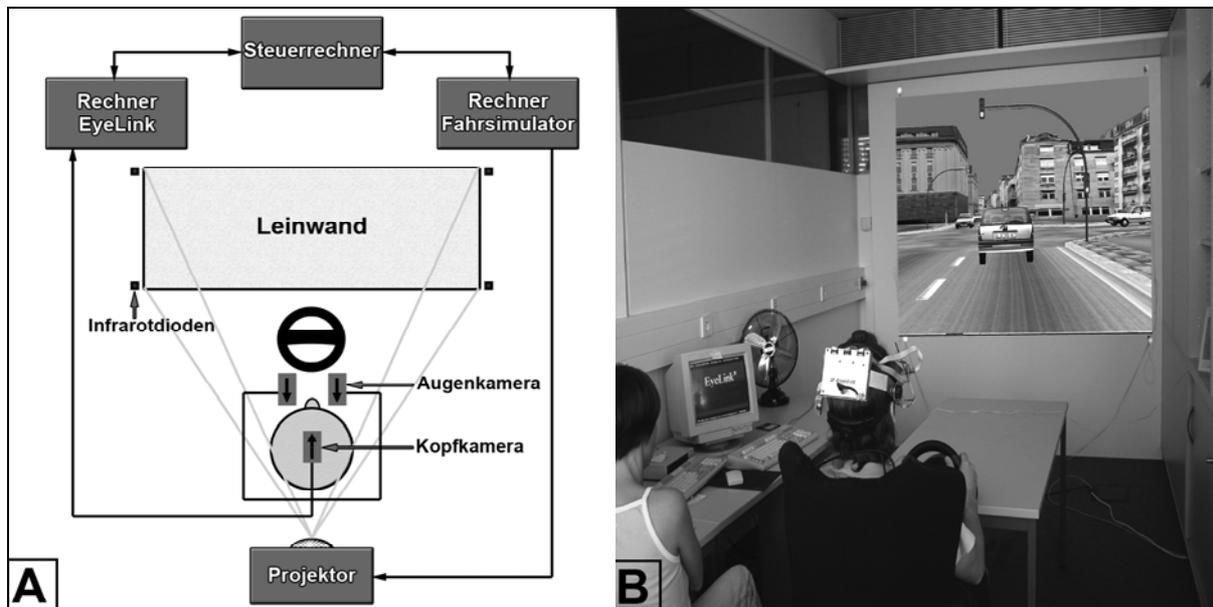


Abbildung 5.2. Darstellung des Versuchsaufbaus. (A) schematische Darstellung (B) Foto.

Der EyeLink-Rechner erfasste und speicherte die Augenbewegungsdaten der Probanden. Der Fahrsimulator-Rechner erzeugte die Simulation und speicherte zusätzlich Daten zum Fahrverhalten der Probanden (Spurhaltung, Geschwindigkeit, Bremsverhalten etc.) und zur Fahrumgebung (Veränderungen, Kreuzungen, andere Verkehrsteilnehmer etc.). Die Speicherung der Reaktion auf Veränderungen, integriert in eine zweite Speicherung der Augenbewegungsdaten, erfolgte über den Steuerrechner. Ein realistisches Fahrgefühl erzeugte ein mit dem Steuerrechner verbundenes Lenkrad mit Kraftrückmeldung sowie ein Gas- und ein Bremspedal. Die Kalibrierung der Augenbewegungskamera wurde ebenfalls über den Steuerrechner

durchgeführt. Ein Videobeamer mit vollständiger SXGA-Auflösung (1280 x 1024 Pixel) projizierte schließlich das Simulatorbild mit einer Bildwiederholfrequenz von 75 Hz auf eine 2 x 1,5 m große Leinwand. An den Ecken der Leinwand befanden sich Infrarotdioden zur Kompensation von Kopfbewegungen. Die Programmierung des Fahrsimulators sowie die programmiertechnische Realisierung der Versuchsanordnung erfolgten mittels der Programmiersprache C++.

5.2.5 Versuchsdurchführung

Nach der Begrüßung wurden die Versuchspersonen gebeten, Platz zu nehmen, und die Augenbewegungskamera wurde angepasst. Um ein „Verrutschen“ der Kamera durch Kopf- oder Körperbewegungen (z.B. durch „energisches“ Lenken) zu verhindern, saßen die Probanden auf einem unbeweglichen Halbschalensitz und trugen zur Stabilisierung des Kopfes eine Halskrause. Der Abstand der Probanden zur Leinwand betrug 3,5 m, so dass die Darstellung dem Erfassungswinkel der Augenbewegungskamera entsprach.

Um sie mit dem Versuchsablauf und dem Simulator vertraut zu machen, absolvierten alle Versuchspersonen eine Probefahrt. Wie im anschließenden Versuch befanden sich dabei beide Hände am Lenkrad. Zur Regulierung der Geschwindigkeit sollten die Versuchspersonen Gas- und Bremspedal mit dem rechten Fuß betätigen. Sie wurden durch Vorlesen einer standardisierten Instruktion aufgefordert, sich wie im normalen Straßenverkehr zu verhalten und dementsprechend Unfälle zu vermeiden. Um Kopf- und Körperbewegungen zu vermeiden, sollten sie nicht links oder rechts abbiegen. Weiter sollten sie sich an einer Richtgeschwindigkeit von 50 km/h orientieren und die Entdeckung einer auftauchenden Veränderung so schnell wie möglich mit einem Knopfdruck signalisieren. Die Knöpfe befanden sich links und rechts auf der Rückseite des Lenkrads und waren bei jeder Lenkposition sowohl für Links- als auch für Rechtshänder gut erreichbar. Von einem gelegentlich kurz auftauchenden grauen Bildschirm (Blank) sollten sie sich nicht stören lassen. Nach der Probefahrt füllten die Probanden einen Fragebogen zur Erhebung von Kovariablen (Alkohol- und Medikamentenkonsum, Sehvermögen, Fahrerlaubnis, Motivation, Konzentration, Wachheit) und soziodemographischen Daten aus. Es folgte, nach Kalibrierung der Augenbewegungskamera, der erste Versuchsdurchgang. Insgesamt gab es vier Durchgänge zu je zehn Minuten. Zwischen jedem Versuchsdurchgang wurde das System neu kalibriert und ein Fragebogen zur Motivation, Konzentration und Wachheit ausgefüllt.

Links hinter der Versuchsperson saß der Versuchsleiter (siehe Abbildung 5.2 B), überwachte die auf dem Monitor des EyeLink-Rechners dargestellten Informationen und notierte Beson-

derheiten auf einem Protokollbogen. Insgesamt dauerte der Versuch etwa eine Stunde. Auf Wunsch wurde den Probanden im Anschluss das Ziel der Untersuchung erklärt.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Datenanalyse

Alle Daten wurden nach zeitlicher Synchronisation der Augenbewegungs- und Reaktionsdaten mit den Simulatordaten auf mögliche Artefakte überprüft. Der finale Datensatz für die statistische Analyse bestand aus 1300 Darbietungen. Auch in der dynamischen Umgebung wurde der Blank nicht als Hinweisreiz genutzt: Die durchschnittliche Falsche-Alarm-Rate bei den Catch Trials lag bei 7,1% (der höchste Wert eines Probanden lag bei 13,6%). Die durchschnittliche Fixationsdauer betrug 429 ms (Folgebewegungen wurden als Fixationen gewertet). Die durchschnittliche Lidschlagrate aller Probanden betrug 9,5 pro Minute mit einer durchschnittlichen Dauer von 148 ms. Sakkaden wurden zwei mal pro Sekunde mit einer durchschnittlichen Dauer von 26 ms und einer mittleren Amplitude von $3,3^\circ$ initiiert. Die durchschnittliche Blank-Dauer betrug 148 ms mit einer Standardabweichung von 14 ms. Die Abweichungen entstanden durch die, in Abhängigkeit der Rechenleistung, schwankende Framenrate des Simulators. Die Mittelwertdifferenzen wurden mittels Varianzanalysen (Allgemeines lineares Modell) mit Messwiederholung (aggregiert) getestet.

5.3.2 Art der Unterbrechung

Abbildung 5.3 zeigt die Entdeckungswahrscheinlichkeit (A) und die Entdeckungszeit (B) für Veränderungen, die während eines Blanks oder während einer Fixation auftauchten.

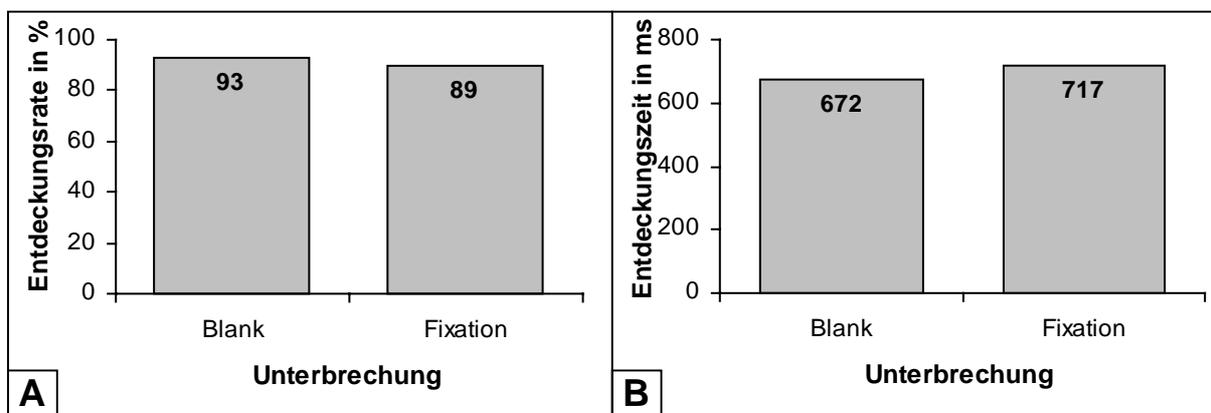


Abbildung 5.3. (A) Entdeckungswahrscheinlichkeit für Blank- und Fixationsbedingung (B) Entdeckungszeit für Blank- und Fixationsbedingung.

Während eines Blanks dargebotene Veränderungen wurden häufiger ($F_{1,11} = 11.797$; $p < .007$) entdeckt als solche, die während einer Fixation auftauchten. Es kam zu einem „umgekehrten“ Effekt der klassischen Veränderungsblindheit.

Veränderungen wurden in der Blank-Bedingung auch schneller ($F_{1,11} = 6.852$; $p < .03$) entdeckt als in der unverdeckten Kontrollbedingung.

Eine retrospektive Analyse der Blickbewegungsdaten ermöglichte es, bei acht Probanden die wenigen Fälle zu isolieren, in denen Veränderungen zufällig während einer Sakkade ($N=38$) oder während eines Lidschlages ($N=17$) auftraten. In Abbildung 5.4 sind Entdeckungswahrscheinlichkeit und Entdeckungszeit für Veränderungen, die während eines Lidschlages, eines Blanks, einer Sakkade oder einer Fixation auftauchten, dargestellt.

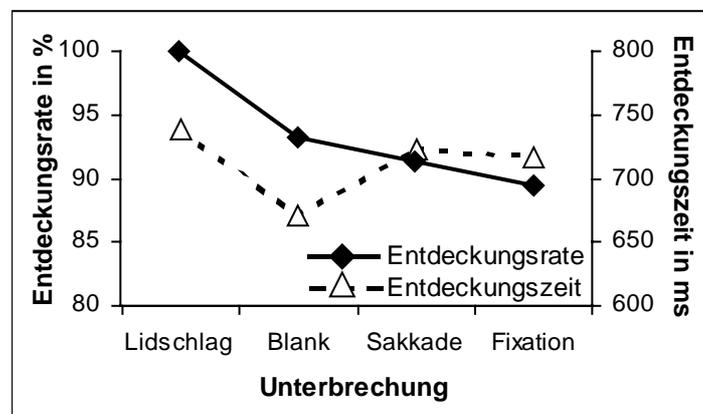


Abbildung 5.4. Entdeckungsrate und Entdeckungszeit nach Unterbrechungsart.

Insgesamt lassen sich die einzelnen Bedingungen wegen der unterschiedlichen Probanden- und Fallzahlen statistisch nicht miteinander vergleichen. Bei einer „spekulativen“ Betrachtung der Grafik fällt jedoch auf, dass Veränderungen, die während Fixationen oder Sakkaden auftauchten, seltener entdeckt wurden als in der Blank-Bedingung, während sie in der Lidschlagbedingung immer entdeckt wurden.

Hinsichtlich der Entdeckungszeit zeigte sich der Blank-Vorteil sowohl gegenüber den anderen Unterbrechungsarten als auch der Fixationsbedingung.

5.3.3 Foveale Distanz

Wie in Experiment 1 wurde die foveale Distanz als Abstand des Mittelpunktes der Fovea zum Mittelpunkt der Veränderung genau zu dem Zeitpunkt, an dem eine Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung beendet war, festgelegt und in zehn Kategorien (1° bis 10°) unterteilt.

Abbildung 5.5 zeigt die Entdeckungsraten in Abhängigkeit der fovealen Distanz zu Veränderungen, die während eines Blanks oder einer Fixation auftauchten. Wegen der geringen Fallzahl wird auf die Darstellung der Sakkaden- und Lidschlagbedingung verzichtet. Da die foveale Distanz „post hoc“ festgelegt wurde und daher die Wahrnehmungen pro Distanz-Kategorie nicht für alle Probanden gleichverteilt sind, werden im Folgenden, wie in Experiment 1, lediglich Tendenzen beschrieben.

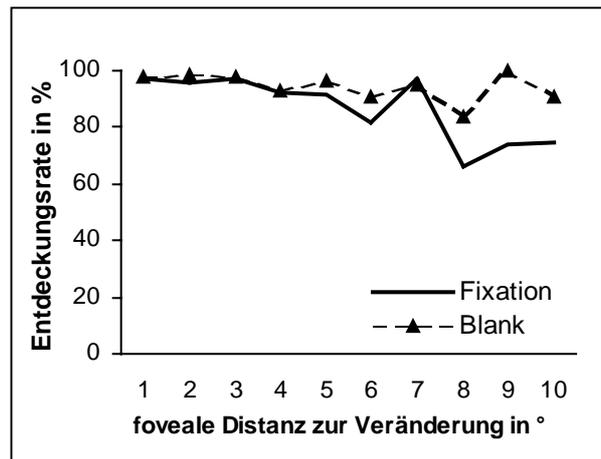


Abbildung 5.5. Entdeckungsrate nach fovealer Distanz für Fixations- und Blank-Bedingung.

In der Blank-Bedingung wurden auftauchende Veränderungen über einen Bereich von 0° bis 10° unabhängig von der Distanz der Veränderung zum Fixationsort gleich gut entdeckt. In der Fixationsbedingung deutete sich ab 7° eine Verschlechterung der Entdeckungsrate an.

5.3.4 Implizite Entdeckung

Wir betrachteten, entsprechend der Vorgehensweise bei Experiment 1, die phasischen Fixationsdauern um den Zeitpunkt des Auftretens der Veränderung bei explizit entdeckten und bei nicht (womöglich aber implizit) entdeckten Veränderungen. Aus folgenden Gründen schlossen wir Veränderungen, die nicht während Fixationen auftraten von der Analyse aus: Veränderungen, die während einer Sakkade auftauchten wiesen eine zu geringe Fallzahl auf. Lidschlagkontingente Veränderungen, auf die diese Problematik ebenfalls zutraf, wurden wegen der möglichen Unterbrechungen von Fixationen ohnehin nicht ausgewertet. Die Blank-Bedingung wurde wegen der Distraktorwirkung des Blanks vernachlässigt.

Abbildung 5.6 zeigt die phasischen Fixationsdauern um das Auftreten der Veränderung für die Fixationsbedingung. Den Nullpunkt stellt die Fixation dar, während der die Veränderung

stattfind. Zum Vergleich wurden die zwei vorangehenden und die zwei nachfolgenden Fixationen, während derer kein Ereignis stattfand, herangezogen.

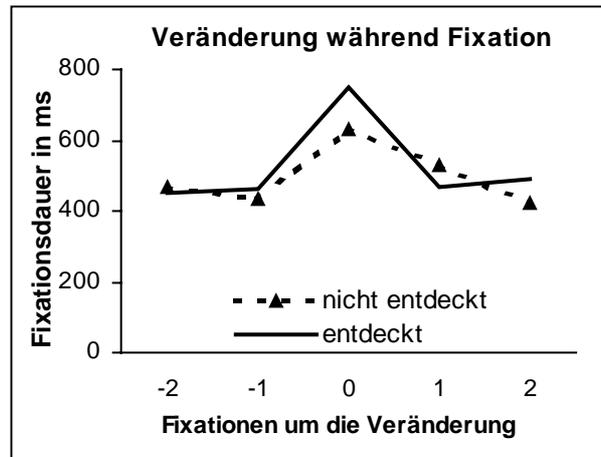


Abbildung 5.6. Phasische Fixationsdauern für entdeckte und nicht entdeckte Veränderungen um den Zeitpunkt der Veränderung, die während einer Fixation stattfand.

Veränderungen, die während einer Fixation (0) auftauchten, führten zu einer deutlichen Verlängerung der Fixationsdauer, verglichen mit den beiden vorangehenden Fixationen (-2, -1). Die Verlängerung zeigte sich sowohl bei Entdeckung ($F_{2,11} = 20,475$; $p < .001$) als auch bei Nichtentdeckung ($F_{2,11} = 4,524$; $p < .03$) einer Veränderung und unterschied sich hinsichtlich der Dauer in beiden Bedingungen nicht ($F_{1,11} = 1,517$; $p > .2$).

Nachdem eine Veränderung entdeckt wurde, zeigte sich ein deutlicher Abfall ($F_{2,11} = 16,806$; $p < .001$) der beiden der Veränderung folgenden Fixationsdauern (+1, +2), verglichen mit der Fixationsdauer zum Zeitpunkt der Veränderung (0). Auch bei nicht entdeckten Veränderungen zeigte sich ein entsprechender Abfall ($F_{2,11} = 3,479$; $p < .05$). Ein Vergleich der beiden Verläufe (0, +1, +2; Entdeckung vs. Nichtentdeckung) zeigt, dass die Fixationsdauern bei den entdeckten und den nicht entdeckten Veränderungen gleichstark abfielen ($F_{3,22} = 2,118$; $p > .1$).

5.3.5 Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit

Wir betrachteten, wie in Experiment 1, getrennt die relative Häufigkeitsverteilung ambienter und fokaler Fixationen vor dem Auftreten der, während Fixationen auftauchenden, Veränderungen (Abbildung 5.7). Der Nullpunkt stellt den Zeitpunkt des Auftauchens einer Veränderung dar. Um Artefakte zu vermeiden, wurden Blank-, Lidschlag- und Sakkadenbedingung erneut vernachlässigt. Als Trennungskriterium diente das Verhältnis von Fixationsdauern und Sakkadenamplituden (siehe hierzu auch Abschnitt 2.4). Ambiente Fixationen wiesen eine

Länge von 70 ms bis 390 ms auf und gingen Sakkaden mit einer Amplitude über 4° voraus. Diese Sakkadenamplitude entspricht der aus einer Untersuchung zur Gefahrenwahrnehmung im Straßenverkehr (Velichkovsky et. al, 2002), die am selben Simulator durchgeführt wurde.

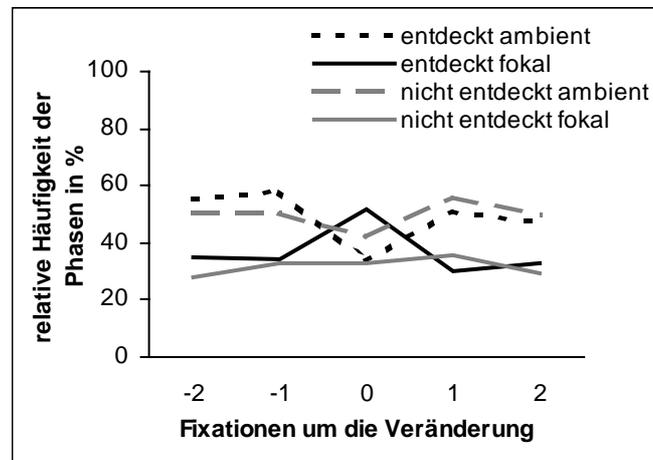


Abbildung 5.7. Relative Häufigkeitsverteilung ambienter und fokaler Fixationen um Veränderungen, die während einer Fixation auftauchten.

Bei Veränderungen, die während einer Fixation auftauchten und entdeckt wurden, befanden sich die Probanden unmittelbar vor der Veränderung (-2, -1) häufiger ($F_{1,11} = 11.547$; $p < .007$) auf der ambienten (57%) als auf der fokalen Ebene (34%). Vor der nichtentdeckten Veränderung zeigte sich dieser Vorteil ($F_{1,11} = 3.610$; $p > .08$) für die ambiente (50%) gegenüber der fokalen (31%) Ebene nicht, wenngleich sich ein Trend in dieselbe Richtung zeigte.

5.4 Zusammenfassende Diskussion

In Experiment 2 zeigten sich generell sehr hohe Entdeckungsraten, da es sich bei den Veränderungen ausschließlich um verkehrsrelevante Additionen handelte, die auch in Experiment 1 am besten entdeckt wurden. Vergleicht man in dieser Kategorie die Fixationsbedingungen der beiden Experimente (Abbildung 4.5 und Abbildung 5.3) fällt auf, dass die Veränderungen in der dynamischen Bedingung vergleichsweise seltener (89% vs. 100%) und langsamer (717 ms vs. 508 ms) entdeckt wurden als in der statischen Bedingung. Dieser Unterschied lässt sich wegen der ungleichen Methodik der Experimente zwar nicht statistisch absichern, könnte aber dennoch auf den Faktor der Dynamik zurückzuführen sein.

Obwohl Veränderungen in einer dynamischen Umgebung wahrscheinlich schwieriger zu entdecken sind, fanden wir, entgegen unserer Hauptannahme, keine klassische Veränderungsblindheit. Vielmehr zeigte sich eine höhere Entdeckungsrate für Veränderungen, die während einem Blank auftauchten, verglichen mit der unverdeckten Fixationsbedingung, also ein um-

gekehrter Effekt von klassischer Veränderungsblindheit. Wie aber lässt sich dieser Blank-Vorteil, der sich auch bei den Entdeckungszeiten zeigte, erklären? Ein technisches Artefakt ist nach genauer Überprüfung des Rechner-Netzwerks und ausführlicher Rücksprache mit den Programmierern unwahrscheinlich. Gegen die Hypothese, dass der Blank per se in einer komplexen dynamischen Umgebung als Hinweisreiz genutzt wurde, spricht die niedrige Falsch-Alarm-Rate bei den Catch Trials der Blank-Bedingung, wenngleich diese höher ausfiel als bei Experiment 1. Auch die perfekte Entdeckungsrate der wenigen Veränderungen, die während eines Lidschlags auftauchten, spräche gegen diese Erklärung. Letztere Überlegung ist jedoch wegen der zu geringen Fallzahl statistisch nicht prüfbar. Ebenfalls wegen zu geringer Fallzahlen bleibt offen, inwieweit sich die Art bzw. Dauer der Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung auf die Entdeckungsrate (und die Entdeckungszeit) auswirken. Ein spekulativer Blick zeigt zumindest, dass mit zunehmender Dauer der Unterbrechung die Entdeckungsrate steigt (die Entdeckungszeit hingegen verhält sich unsystematisch). Womöglich erleichtert jede Unterbrechung, die lang genug der virtuellen dynamischen „Bewegungsflut“ entgegenwirkt, die Entdeckung einer Veränderung. Dies kann jedoch ausschließlich durch eine Replikationstudie überprüft werden, in der alle Unterbrechungsarten untersucht werden und erscheint zunächst nicht plausibel. Möglicherweise ist die Erklärung für den Blank-Vorteil ungleich einfacher: Die Probanden nutzten eine Strategie. In beiden Experimenten erhoben wir diesbezüglich leider keine Daten, es erscheint uns jedoch in der künstlichen Simulatorumgebung, im Vergleich zu den Bildern aus Experiment 1, wahrscheinlicher, sich die wenigen potentiellen Objekte in der Szene zu merken, zumal sich diese viel deutlicher vom Rest des Szenarios (z.B. von Häusern) abhoben und zum Teil unnatürlich statisch (wie Pappaufsteller) wirkten. Tatsächlich ergab sich bei einer nachträglichen mündlichen Befragung von Probanden, dass einige die Objekte zählten. Bei der Nutzung einer derartigen Strategie wäre es durchaus denkbar, dass der Blank schließlich doch als Hinweisreiz dafür genutzt wurde, aufmerksam darauf zu achten, ob sich die Anzahl der Objekte ändert. Denkbar wäre auch, dass in der von dem Blank provozierten Phase höherer Bereitschaft ein neues Objekt, das plötzlich zu bereits gemerkten hinzukommt, überzufällig häufig entdeckt wird. Letztere auch als *naming* bezeichnete Strategie setzt jedoch eine verbale Enkodierung und damit zumindest eine teilweise Identifizierung der gemerkten Objekte voraus (siehe hierzu auch Simons, 1996). Leider können auch die bisher einzigen bekannten vergleichbaren Untersuchungen zur Veränderungsentdeckung in virtueller dynamischer Umgebung von Wallis & Bühlhoff (2000) und Shinoda et al. (2001) bezüglich unseres Blank-Vorteils oder Veränderungsblindheit im Allgemeinen keine Information liefern, da dort keine Kontrollbedingungen existierten oder

zumindest nicht von den Autoren dargestellt werden. Deubel et al. (1996) berichten in einer Untersuchung zur sakkadischen Unterdrückung jedoch von einem artverwandten Phänomen: Beim sogenannten Blanking-Effekt führt die künstliche „Verlängerung“ einer Sakkade durch einen unmittelbar danach für 50 ms bis 300 ms dargebotenen Blank dazu, dass Veränderungen (Ortsverschiebung einfacher Reize), die während einer solchen Sakkade dargeboten werden, deutlich besser erkannt werden als Veränderungen, die während einer nicht verlängerten Sakkade dargeboten werden. Das Phänomen zeigt sich auch dann, wenn statt eines Blanks eine nicht globale Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung (horizontaler Balken, der die Veränderung verdeckt) genutzt wird oder wenn Distraktoren (zwei Balken, die die Veränderung nicht verdecken) verwendet werden (Deubel et al., 2002). Interessanterweise führt die Verlängerung einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung durch einen unmittelbar auf eine Sakkade folgenden Lidschlag nicht zu einer Verbesserung der Veränderungsentdeckung (Deubel et al., im Druck).

Bezüglich der fovealen Distanz fanden wir entsprechend unserer Annahme, dass relevante Additionen im (para)fovealen und peripheren Bereich (bis 10°) in der Blank-Bedingung gleich gut und in der Fixationsbedingung überwiegend gleich gut entdeckt wurden. Die Ergebnisse aus Experiment 1 konnten also in einer virtuellen dynamischen Umgebung bestätigt werden.

Auch bestätigt wurden unsere Annahmen hinsichtlich der impliziten Veränderungsentdeckung zum Zeitpunkt des Auftauchens der Veränderung, zumindest in bezug auf die auswertbare Fixationsbedingung: Nicht nur entdeckte sondern auch nicht entdeckte Veränderungen gingen mit einer deutlichen Verlängerung der Fixationsdauer zum Zeitpunkt des Auftauchens der Veränderung einher. Diese fällt im Vergleich zum ersten Experiment insgesamt sogar um 172 ms länger aus, was sich wahrscheinlich auf die komplexere dynamische Umgebung zurückführen lässt. Ein weiterer Unterschied zu Experiment 1 zeigt sich bei der Betrachtung der Verläufe der phasischen Fixationsdauern nach der Veränderung. Sowohl nach entdeckten als auch nach nicht (explizit) entdeckten Veränderungen fielen die Dauern der beiden nachfolgenden Fixationen gleichstark ab. Womöglich zeigt sich in einer komplexen dynamischen Umgebung im Vergleich zu einer statischen nach nicht entdeckten Veränderungen keine verlängerte Reaktionsbereitschaft, da die Verarbeitung bedeutend größerer Datenmengen diese Bereitschaft hemmt.

In bezug auf die Ebenen der visuellen Aufmerksamkeit wurden unsere Annahmen teilweise bestätigt. Die Probanden befanden sich in der analysierten Fixationsbedingung unmittelbar

vor der Entdeckung deutlich häufiger auf der ambienten Ebene der visuellen Aufmerksamkeit, vor Nichtentdeckung zeichnete sich zumindest ein Trend in dieselbe Richtung ab. Auch in der komplexeren dynamischen Umgebung scheinen die Probanden also, bei Instruktion zur einfachen Entdeckung, überwiegend bereits bei einer Lokalisierung einer Veränderung zu reagieren. Diese Ergebnisse schließen prinzipiell nicht aus, dass auf beiden Ebenen Merk-Strategien angewandt wurden. Es sei auch hier darauf hingewiesen, dass sich diese Vermutungen nur mit einer experimentellen Trennung von Lokalisation und Identifikation überprüfen ließen.

Diese ersten Ergebnisse in einer verkehrsrelevanten dynamischen Umgebung müssen repliziert und erweitert werden, um Aufschluss über das tatsächliche Ausmaß der Veränderungsblindheit im Straßenverkehr zu erhalten. In jedem Fall wäre es bei dem unklaren Blank-Vorteil voreilig und wahrscheinlich falsch, „Entwarnung“ zu geben. Da unverdeckte Veränderungen in dynamischer Umgebung wahrscheinlich schwieriger zu entdecken sind als in der statischen, raten wir davon ab, Ergebnisse aus statischen Untersuchungen zur Veränderungsblindheit auf dynamische Umgebungen, z.B. auf den Straßenverkehr zu übertragen.

6 Experiment 3: Direkter Vergleich statischer und dynamischer natürlicher Umgebungen mit Variation der Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung.

6.1 Einleitung

Die unterschiedlichen Versuchsdesigns der beiden ersten Experimente erlauben keinen direkten Vergleich der widersprüchlichen Ergebnisse. Ein derartiger Vergleich ist jedoch zwingend notwendig, um Aufschluss über das tatsächliche Ausmaß von Veränderungsblindheit in statischer und dynamischer Umgebung zu erlangen. Daher untersuchten wir im dritten Experiment explorativ, wie sich Blanks unterschiedlicher Dauer auf die (Nicht-)Entdeckung plötzlich auftauchender oder verschwindender identischer Objekte in einer dynamischen (Filme aus der Perspektive eines Fahrers) und einer vergleichbaren statischen Situation (Standfotos derselben Filme) auswirken. Auf die Erhebung von Augenbewegungen wurde zu Gunsten eines optimalen Vergleichs verzichtet (die Augenbewegungskamera ließ sich nicht in die Software zum Abspielen von Filmen einbinden). Sakkaden und Lidschläge wurden in dieser Untersuchung mittels Blanks simuliert. Weiter interessierte uns, ob sich auch ohne die Erhebung von Augenbewegungsparametern Anzeichen für eine implizite Wahrnehmung von Veränderungen zeigen und ob entdeckte Veränderungen eher lokalisiert oder identifiziert werden.

6.2 Methode

6.2.1 Probanden

An der Untersuchung nahmen 16 Psychologiestudenten der TU-Dresden (9 weibliche und 7 männliche, im Alter von 19 bis 35 Jahren) teil. Sie wurden aus dem Bekanntenkreis des Versuchsleiters und über Aushänge rekrutiert. Alle Probanden verfügten über normales oder entsprechend korrigiertes Sehvermögen und waren im Besitz einer Fahrerlaubnis. Sie standen nicht unter Alkohol- oder Medikamenteneinfluss und waren motiviert, konzentriert und wach. Für die Teilnahme erhielten sie entweder 15 Euro oder fünf Versuchspersonenstunden. An einer Untersuchung zur Veränderungsblindheit hatten sie zuvor nicht teilgenommen.

6.2.2 Stimuli und Versuchsdesign

Die unabhängige Variable *Umgebung* wurde getrennt in eine *dynamische* und eine *statische* Bedingung. Für einen optimalen Vergleich der beiden Umgebungen entschieden wir uns aus

mehreren Gründen gegen einen erneuten Einsatz unseres Fahrsimulators. Zunächst sollten mögliche Artefakte und technische Probleme (Framerate etc.) aus Experiment 2 nicht unnötig übernommen werden. Außerdem ist ein „aktiver“ Fahrsimulator nicht die optimale Lösung für einen Vergleich, da es für „Eigenlenkung“ in der dynamischen Bedingung kein statisches Äquivalent gibt. In der dynamischen Bedingung wäre daher ein „Autopilot“ vorzuziehen (zu Unterschieden in der Entdeckungsleistung bei Fahrern und Beifahrern siehe Wallis & Bülhoff, 2000). Eine ökonomischere und natürlichere Alternative zum Autopilot eines Simulators stellen für die dynamische Bedingung Filme dar. Da es jedoch nicht ohne weiteres möglich ist, Veränderungen kontrolliert in freier Natur zu filmen und eine entsprechende digitale Nachbearbeitung sehr zeit- und kostenintensiv ist, nutzten wir in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Gebäudelehre und Entwerfen der Fakultät Architektur die Methode der Videogestützten Modellsimulation. Für die dynamische Bedingung erstellten wir so 336 kurze Filme (à 16 s), in denen sich auf einer insgesamt 180 m langen Straße liegende Würfel auf den ersten 150 m aus der Sicht eines mit 36 km/h fahrenden Kleinbusfahrers (Augenhöhe: 1,50 m) verändern konnten. Außer bei den Catch Trials veränderte sich pro Film ein Würfel. Die Würfel waren identisch in Farbe (gelb), Größe (50 cm Kantenlänge) und Ausrichtung, so dass möglichst wenige unterschiedliche Faktoren die Entdeckung beeinflussen konnten. Merkstrategien und Erfahrungsvorteile wurden so (und durch die hohe Anzahl der Würfel) verhindert und eine Wiedererkennung in der unten beschriebenen statischen Bedingung war praktisch unmöglich.

Ein Würfel konnte entweder auftauchen oder verschwinden, die *Art der Veränderung* wurde also zweifach gestuft. Insgesamt waren je nach Art der Veränderung 101 (bei *Subtraktion*) oder 100 (bei *Addition*) Würfel zufällig auf der gesamten Strecke verteilt. Genauer wurden 77 Würfel zufällig verteilt und zusätzlich (in 8 Reihen zu 6 Platzierungsmöglichkeiten) zufällig jeweils 3 Target-Würfel positioniert. So waren letztlich entweder alle 101 Würfel vorhanden (von denen in der Subtraktionsbedingung ein Target-Würfel verschwand) oder einer der insgesamt 24 Target-Würfel fehlte (und wurde in der Additionsbedingung wieder hinzugefügt). Der Abstand der Würfel zueinander war so groß, dass sich die Würfel aus der Sicht der Probanden nicht überdeckten.

Abbildung 6.1 A zeigt Beispielstandbilder einer Subtraktion aus der dynamischen Versuchsbedingung, unmittelbar vor und nach einem Blank. In Abbildung 6.1 B ist die Target-Würfel Anordnung auf der Strecke dargestellt.

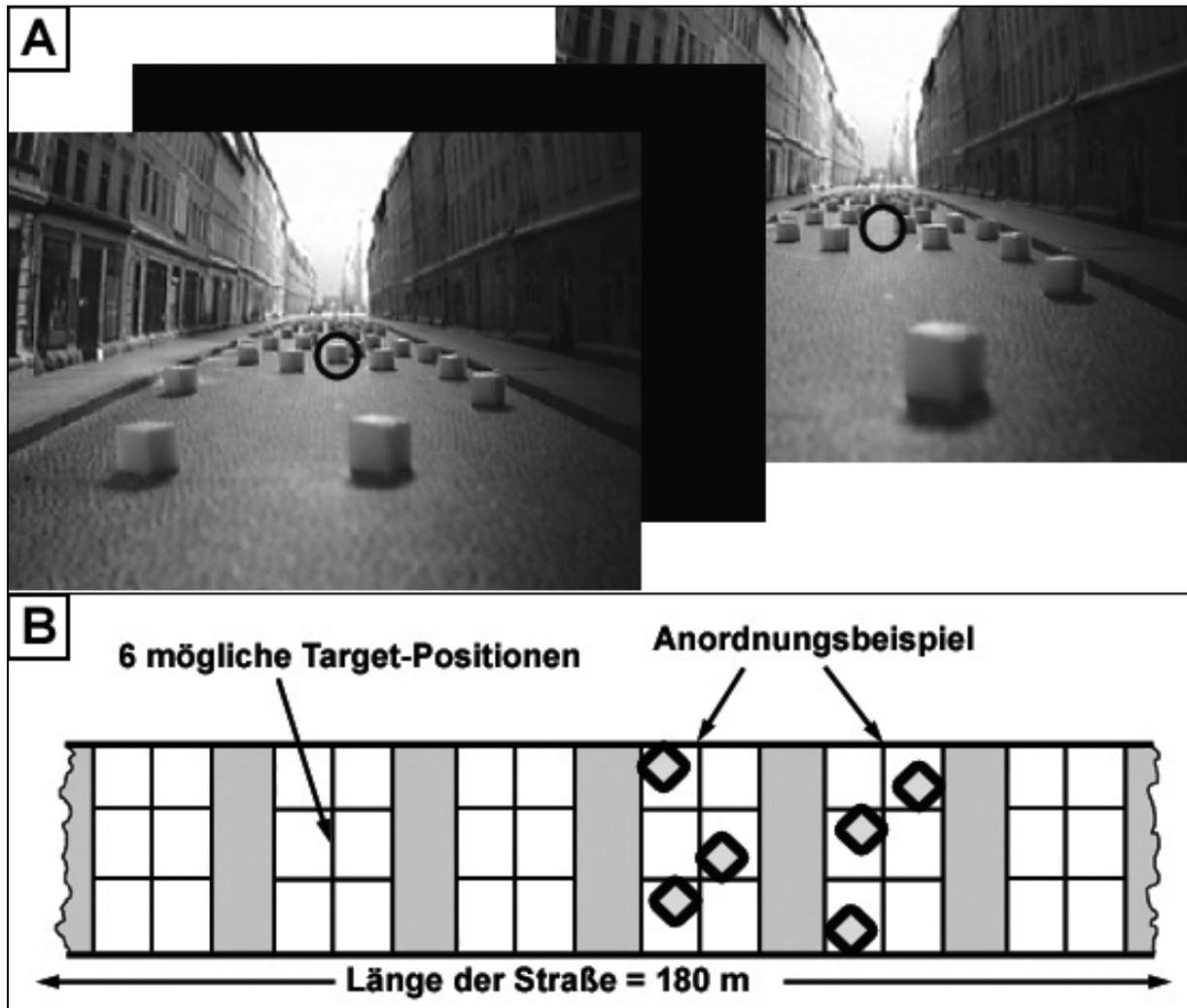


Abbildung 6.1. (A) Stimulusmaterial aus der dynamischen Versuchsbedingung (ein Würfel verschwindet während einem zeitlich variablen Blank), (B) Schema der Target-Würfel-Anordnung auf der Strecke, zur Ausbalancierung des Veränderungsortes.

Die *Unterbrechungsdauer* wurde vierfach gestuft, d.h. die Veränderung fand während eines *Blanks* von 40 ms (durchschnittliche Sakkadendauer), 160 ms (durchschnittliche Lidschlagdauer) oder 320 ms (um zusätzlich Wirkung der Dauer der Unterbrechung zu testen) oder während einer *unverdeckten Kontrollbedingung* statt. Um auszuschließen, dass die Blanks als Hinweisreiz für eine Veränderung genutzt werden, wurde in allen entsprechenden Bedingungen zusätzlich die gleiche Anzahl von Filmen ohne eine Veränderung dargeboten (Catch Trials). Weiter traten die Blanks (ausbalanciert über alle Bedingungen) in zwei unterschiedlichen Abständen zu den Target-Reihen auf, um zu vermeiden, dass die Probanden nach einer Anzahl von Durchgängen vorhersagen können, in welchem Abstand die Veränderung stattfinden wird.

Die statische Bedingung entsprach in allen Punkten der dynamischen, nur dass anstatt Filmen die entsprechenden Standbilder der Veränderungen aus den Filmen verwendet wurden. In der dynamischen Bedingung allerdings „bewegte“ sich der Proband auch während eines Blanks bis zu 8 Frames (je nach Blank-Dauer) weiter vorwärts, um das Gefühl eines „Hängenbleibens“ zu vermeiden. Dieses würde entstehen, wenn der Film während des Blanks anhalten würde. Würde man nun in der statischen Bedingung die exakt entsprechen Bilder (Frames) der dynamischen Bedingung verwenden - also als statisches Anfangsbild das letzte Film-Frame vor dem Film-Blank und als statisches verändertes Bild das erste Film-Frame nach dem Film-Blank – hätte der Proband dadurch das Gefühl eines „Vorwärtssprungs“ (am deutlichsten in der Kontrollbedingung). Daher wurde in der statischen Bedingung nur das erste Film-Frame nach dem Film-Blank (bei Addition) oder nur das letzte Film-Frame vor dem Film-Blank (bei Subtraktion) verwendet, so dass der Target-Würfel in der statischen Bedingung zum Zeitpunkt der Veränderung hinsichtlich der Größe exakt dem in der dynamischen Bedingung entsprach. Für diese Bilder wurde jeweils das korrespondierende Film-Frame ohne den entsprechenden Target-Würfel gesucht und als Anfangsbild (Addition) oder verändertes Bild (Subtraktion) dargeboten. Abbildung 6.2 zeigt ein Beispiel für eine Addition. In den Catch Trials wurden nur die letzten Film-Frames vor den Film-Blanks genutzt und vor sowie nach den Blanks dargeboten.

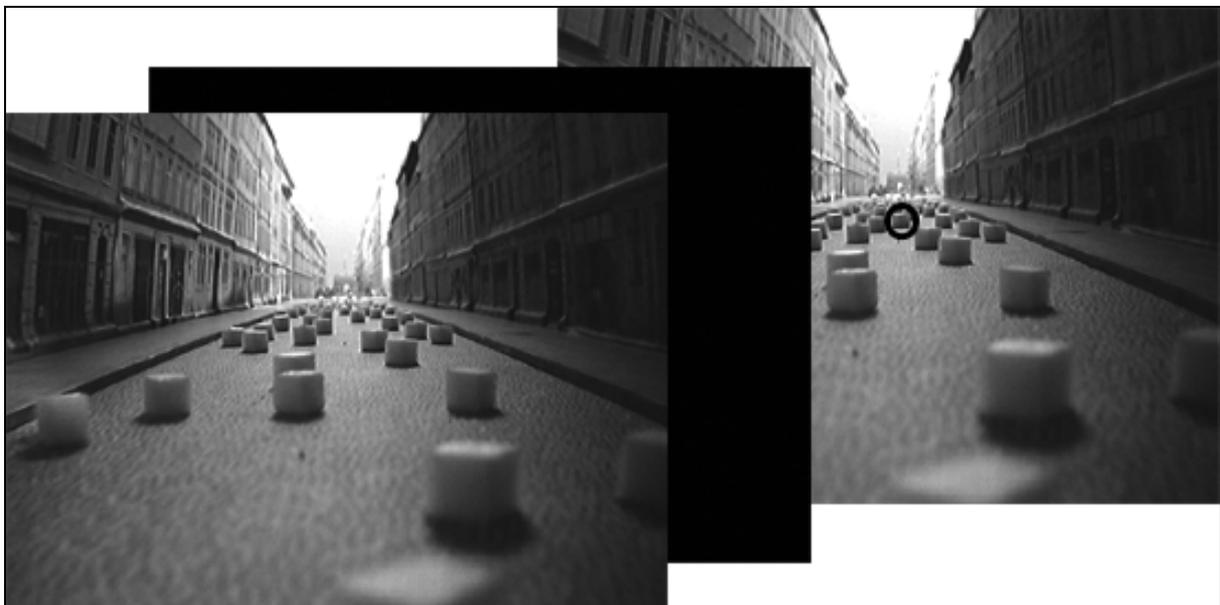


Abbildung 6.2. Stimulusmaterial aus der statischen Versuchsbedingung (ein Würfel taucht während einem zeitlich variablen Blanks auf).

Da alle Würfel in Größe, Farbe und Orientierung identisch waren, können Lerneffekte von einer Umgebungsbedingung auf die andere ausgeschlossen werden. Dennoch wurden die ein-

zelen Durchgänge in beiden Umgebungen randomisiert dargeboten und die Reihenfolge der Umgebungsbedingung in Blöcken ausbalanciert. Das Ausgangsbild wurde in der statischen Bedingung, in Anlehnung an Experiment 1, mit 4 s ausreichend lang dargeboten, das veränderte Bild maximal 2,5 s (falls keine Rückmeldung stattfand). Letzteres entsprach der Zeit, in der ein „veränderter“ Würfel in der dynamischen Bedingung spätestens aus dem Bild verschwunden war, also passiert wurde. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es uns in der dynamischen Bedingung, im Gegensatz zur statischen, programmiertechnisch nicht gelang, einen Film nach Entdeckung abzubrechen. Die Probanden sahen also immer den kompletten Film.

Um zusätzlich Informationen zur *Lokalisierung* und *Identifizierung* der Veränderungen zu erlangen, wurde jeweils unmittelbar nach einem Durchgang eine Bildschirmbefragung durchgeführt. Hier erschienen nach einer vorherigen Bestätigung, dass eine Veränderung entdeckt wurde („Hast Du eine Veränderung bemerkt?“: Ja) zwei weitere Fragen zur Lokalisation und zur Identifikation (Abbildung 6.3 A).

Abbildung 6.3 zeigt zwei Screenshots einer Bildschirmbefragung. Beide Screenshots haben den Titel 'Hast Du eine Veränderung bemerkt?' und zwei Buttons 'Ja' und 'Nein'.

(A) Dynamische und statische Bedingung zur Lokalisation und Identifikation: Nach dem Klick auf 'Ja' werden zwei Fragen gestellt:

- „Wo ist die Veränderung aufgetreten?“ mit den Optionen: links, mitte, rechts, bin mir nicht sicher.
- „Welcher Art war die Veränderung?“ mit den Optionen: Würfel verschwunden, Würfel aufgetaucht, bin mir nicht sicher.

Ein 'OK' Button befindet sich am unteren Rand.

(B) Statische Bedingung zur impliziten Erkennung: Nach dem Klick auf 'Nein' werden zwei Fragen gestellt:

- „Rate trotzdem: Wo ist die Veränderung aufgetreten?“ mit den Optionen: links, mitte, rechts.
- „Welcher Art war die Veränderung?“ mit den Optionen: Würfel verschwunden, Würfel aufgetaucht.

Ein 'OK' Button befindet sich am unteren Rand.

Abbildung 6.3. Bildschirmbefragung. (A) In der dynamischen und in der statischen Bedingung zur Lokalisation (mittleres Feld) und Identifikation (unteres Feld), nachdem eine Veränderung rückgemeldet wurde (oberes Feld). (B) Nur in der statischen Bedingung zur impliziten Erkennung (Lokalisation: mittleres Feld; Identifikation: unteres Feld), nachdem eine Veränderung nicht rückgemeldet wurde (oberes Feld).

Bezüglich der Lokalisation wurde nach dem Ort der Veränderung (links, mittig, rechts, nicht sicher) gefragt, bezüglich der Identifikation nach der Art der Veränderung (Addition, Sub-

traktion, nicht sicher). Da sich die Würfel in jeder Hinsicht glichen, konnte nur diese abgeschwächte und weniger trennscharfe Form der Identifikation genutzt werden, bei der nicht die Identität des veränderten Objekts (z.B. Hase vs. Igel) sondern die Identität der Veränderung an sich (z.B. Art der Veränderung) abgefragt wurde (siehe hierzu auch Rensink, 2002). Wurde eine Veränderung nicht entdeckt und dies bestätigt („Hast Du eine Veränderung bemerkt?“: Nein), wurde die Befragung in der dynamischen Bedingung beendet, da Vorversuche zeigten, dass eine weitere Befragung in dieser zeitintensiven Bedingung zu anstrengend für die Probanden ist. In der kürzeren statischen Bedingung hingegen folgte eine weitere Befragung zur *impliziten Erkennung*. Hier sollten die Probanden raten, wo die Veränderung stattfand und welcher Art sie war (Abbildung 6.3 B).

Abhängige Variablen waren *Entdeckungswahrscheinlichkeit*, *Entdeckungszeit*, *Angaben zur Lokalisierung oder Identifizierung der Veränderungen* und in der statischen Bedingung zusätzlich die *Ratewahrscheinlichkeit lokalisierter und identifizierter Veränderungen* bei vorheriger Nichtentdeckung. Die Entdeckungszeit wurde von dem Moment an gemessen, in dem das veränderte Bild auftauchte.

6.2.3 Hypothesen

In dieser letzten explorativen Untersuchung hatten wir folgende theoretisch begründete Annahmen:

Wir erwarteten, unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Experiment 1 und skeptisch gegenüber der in künstlicherer Umgebung gewonnenen Ergebnisse aus Experiment 2, sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Bedingung einen Effekt der klassischen Veränderungsblindheit, also eine geringere Entdeckungsrate bei Veränderungen, die während eines Blanks dargeboten werden, verglichen mit der unverdeckten Kontrollbedingung. Wir erwarteten darüber hinaus, dass das Ausmaß der Veränderungsblindheit in der „kognitiv aufwendigeren“ dynamischen Umgebung größer ist als in der statischen. Auch sollten verdeckte Veränderungen in statischer und dynamischer Umgebung später entdeckt werden als in der Kontrollbedingung.

Hinsichtlich der Unterbrechungsdauer nahmen wir an, dass sich sowohl die Entdeckungsrate als auch die Entdeckungszeit von Veränderungen, die während 40 ms oder 160 ms langen Blanks aber auch während den längeren Blanks von 320 ms dargeboten werden, in der statischen und in der dynamischen Umgebung, nicht voneinander unterscheiden.

In bezug auf die Art der Veränderung sollten, wie in Experiment 1, Additionen besser und schneller entdeckt werden als Subtraktionen, sowohl in statischer als auch in dynamischer Umgebung.

Weiter nahmen wir an, dass Probanden mit dem durch die Instruktion vermittelten Wissen, dass sie nach jedem Durchgang gefragt werden, wo eine Veränderung stattfand (Lokalisation) und ob diese aufgetaucht oder verschwunden ist (Identifikation), in statischer und dynamischer Bedingung bezüglich Lokalisation und Identifikation gleich gute Erinnerungsleistungen zeigen.

Letztlich erwarteten wir in der statischen Bedingung bei nicht entdeckten Veränderungen, wie in den beiden ersten Experimenten, Anzeichen für eine implizite Entdeckung. Veränderungen sollten also durch „Raten“ überzufällig häufig richtig lokalisiert und identifiziert werden.

6.2.4 Apparatur

Mittels der Methode der Videogestützten Modellsimulation wurde ein Dresdner Straßenzug mit angrenzenden Häusern originalgetreu nachgebaut (Abbildung 6.4). Hierzu wurden hochauflösende Fotografien (1024 x 768 Pixel) der Originalumgebung angefertigt, auf mattem Spezialpapier ausgedruckt (600 dpi) und auf einem maßstabgerechten Styropormodell (1:100) der Originalumgebung angebracht. Das Modell wurde anhand von Originalplänen erstellt. Für die Raumbildung bedeutende geometrische Elemente (Dachlinie, Gesimslinie, Sockellinie und Bordstein) wurden plastisch modelliert. Das fertige Modell, mit einer Gesamtlänge von 1,80 m, wurde in einem Raum mit konstanten Lichtverhältnissen vor einer hellblauen Stoff-Umgebung befestigt (Abbildung 6.4).

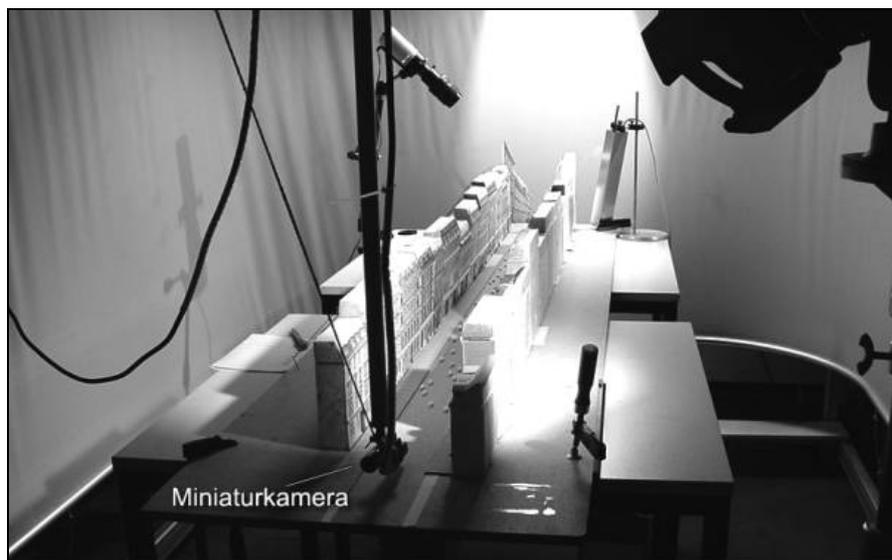


Abbildung 6.4. Aufbau der videogestützten Modellsimulation.

Durch eine professionelle Ausleuchtung wurde aus Sicht der Kamera, die Stimmung eines sonnigen Tages mit korrektem Schattenwurf erzeugt. Die Trennlinie zwischen Modell und Stoff war am Horizont nicht zu erkennen. Etwa 2 m über dem Modell befand sich ein Aluminiumrahmen mit einer Schiene, an der sich ein verstellbarer, von Schrittmotoren angetriebener, herabhängender Kamerakran befand. Die Geschwindigkeit der Schrittmotoren und damit der Kamerafahrt waren exakt programmierbar. Definierte Aufnahmewege der Kamera konnten so beliebig oft wiederholt werden.

Bei der Kamera handelte es sich um eine Mini-Fernsehkamera (PAL-Composit-Signal), die 25 Vollbilder pro Sekunde aufzeichnet. Wir verwendeten ein Weitwinkelobjektiv mit einem Linsendurchmesser von 17 mm, 7 mm Brennweite und einem horizontalen Erfassungswinkel von etwa 45°. Die Kamera fuhr 25 mal mit einer konstanten Geschwindigkeit von 33 mm/s in einer Höhe von 7,5 mm über dem Boden durch den modellierten Straßenzug. Inhaltlich unterschieden sich die Aufnahmen lediglich dadurch, dass entweder alle 101 Würfel vorhanden waren oder einer der 24 Target-Würfel fehlte.

Das analoge S-VHS-Signal der Kamera wurde während der Aufnahme in ein digitales Signal umgewandelt und als AVI-Datei (volle PAL-Auflösung, 24bit True Color Farbtiefe) auf einem *Videoschnitt-Rechner* gespeichert. Auf diesem Schnitt-Rechner wurde die Geschwindigkeit der Filme zunächst verdreifacht, so dass die resultierende Geschwindigkeit etwa 100 mm/s entsprach, die in den Filmen wiederum als eine Fahrgeschwindigkeit von 36 km/h wahrgenommen wurde. Bei den Originalaufnahmen wurde deshalb eine langsamere Kamerafahrt programmiert, weil alle Filme, bis auf die jeweilige Veränderung, absolut identisch und hierfür auch absolut „ruckelfrei“ sein mussten, um sie später „unsichtbar“ ineinander schneiden zu können. Aus dem Rohmaterial konnten so schließlich Filme hergestellt werden, in denen jeweils entweder ein Würfel plötzlich verschwand oder auftauchte. Im Falle einer Addition z.B. wurde der Anfang eines Filmes benutzt, bei dem ein Target-Würfel fehlt und (gegebenenfalls nach dem Einfügen eines Blanks) zum Zeitpunkt der Veränderung „in“ den Film geschnitten, in dem alle 101 Würfel vorhanden waren. Alle Filme wurden zur endgültigen Darbietung in das MPEG 1 Format komprimiert.

Den eigentlichen Versuch steuerte der Windows-Steuerrechner aus Experiment 2, auf dem auch die Reaktionen der Probanden und die Daten der anschließenden Befragung gespeichert wurden. Die fertigen Filme und Bilder wurden, entsprechend Experiment 2, mittels Videobeamer (Auflösung: 720 x 576 Pixel) auf einer Leinwand (2 x 1,5 m) dargeboten. Die Programmierung der Versuchsanordnung erfolgte mittels der Programmiersprache Delphi.

6.2.5 Versuchsdurchführung

Wegen des großen zeitlichen Aufwands absolvierten die Probanden die Untersuchung jeweils an zwei verschiedenen Tagen – an einem Tag die statische Bedingung, am anderen die dynamische. Zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten lagen durchschnittlich drei Tage. Nach der Begrüßung wurden die Probanden jeweils zu Beginn einer Untersuchung aufgefordert, einen Fragebogen zur Erhebung von Kovariablen (Alkohol-, Koffein- und Medikamentenkonsum, Sehvermögen, Motivation, Konzentration, Wachheit) und soziodemographischen Daten auszufüllen. Anschließend wurden sie in beiden Untersuchungen in einem Abstand von 3,5 m, entsprechend Experiment 2, vor der Leinwand an einem Tisch platziert. In der dynamischen Umgebung wurden die Probanden mittels standardisierter Bildschirminstruktion angewiesen, auf mögliche auftauchende oder verschwindende Würfel in den folgenden Filmen zu achten. Eine derartige Veränderung sollten sie sofort mit einem Druck auf die Enter-Taste, der vor ihnen auf dem Tisch liegenden Tastatur rückmelden. Von einem gelegentlich kurz auftauchenden schwarzen Bildschirm (Blank) sollten sie sich nicht stören lassen. Nach einer Erläuterung zur Befragung von Lokalisation und Identifikation nach einer Entdeckungsrückmeldung folgte die Demonstration eines Films mit und eines Films ohne Blank. Nach einem Probedurchgang begann der eigentliche Versuch, der insgesamt 120 Minuten dauerte. Nach 40 und 80 Minuten fand eine fünfminütige Pause statt. Die Instruktion in der statischen Umgebung entsprach der in der dynamischen, mit dem Unterschied, dass die Probanden hier auf mögliche Veränderungen in den Standbildern reagieren sollten und dass zusätzlich die Befragung zur impliziten Wahrnehmung nach Nichtentdeckung erläutert wurde. Die statische Untersuchung dauerte insgesamt 70 Minuten. Nach der Hälfte dieser Zeit fand eine fünfminütige Pause statt.

In beiden Untersuchungen wurden Verhaltensbeobachtungen vom Versuchsleiter auf einem Protokollbogen notiert. Weiterhin sollten die Probanden nach beiden Untersuchungen erneut Angaben zu Motivation, Konzentration und Wachheit machen und wurden befragt, ob und welche Strategien sie nutzten, die eine Entdeckung von Veränderungen hätten vereinfachen können. Abschließend wurde auf Wunsch das Ziel der Untersuchung erklärt.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Datenanalyse

Alle Daten wurden auf mögliche Artefakte überprüft. Eine Versuchsperson wurde aussortiert, weil in der dynamischen Bedingung nach der Hälfte des Versuches die Verhaltensdaten nicht

aufgezeichnet wurden. Zwei weitere Versuchspersonen wurden aufgrund zu hoher Falscher-Alarm-Rate (über 38%) in der statischen oder der dynamischen Bedingung aussortiert. Von den verbleibenden Probanden (7 Männer und 6 Frauen) wurde der Blank nicht als Hinweisreiz genutzt: In der statischen Umgebung lag die durchschnittliche Falsche-Alarm-Rate bei den Catch Trials bei 6,3% (der höchste Wert eines Probanden lag bei 21,5%), und in der dynamischen Umgebung gab es durchschnittlich 5,2% falsche Alarme (Höchstwert: 18,8%). Anhand der entsprechenden Befragung zeigten sich keine Hinweise auf effektiv nutzbare Entdeckungsstrategien, wie beispielsweise ein Abzählen der Würfel oder das Einprägen der Würfelanordnung. Auch gab keiner der Probanden an, dass der Ort einer Veränderung vorhersagbar gewesen wäre. Die Mittelwertdifferenzen wurden mittels Varianzanalysen (Allgemeines lineares Modell) mit Messwiederholung (aggregiert) oder mittels Chi-Quadrat-Anpassungstests (implizite Erkennung) getestet.

6.3.2 Unterbrechungsdauer

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit (A) und die Entdeckungszeit (B) für Veränderungen, die während einer der drei Unterbrechungsdauern oder während der unverdeckten Kontrollbedingung dargeboten wurden, sind in Abbildung 6.5 dargestellt, jeweils für statisches und dynamisches Stimulusmaterial.

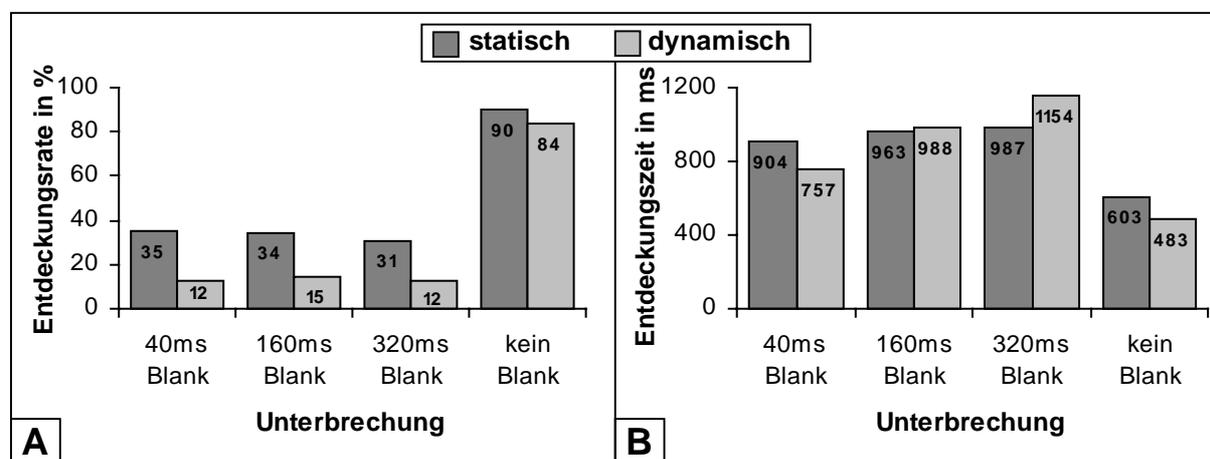


Abbildung 6.5. (A) Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Unterbrechungsdauer und Stimulusmaterial (B) Entdeckungszeit nach Unterbrechungsdauer und Stimulusmaterial.

Hinsichtlich der Entdeckungswahrscheinlichkeit zeigte sich, dass durch einen Blank verdeckte Veränderungen immer deutlich schlechter entdeckt wurden als nicht verdeckte (statisch: $F_{3,12} = 205,484$; $p < .001$; dynamisch: $F_{3,12} = 364,469$; $p < .001$), es also zu Effekten klassischer Veränderungsblindheit kam. Die einzelnen Blank-Dauern unterschieden sich nicht voneinander (statisch bzw. dynamisch alle Vergleiche: $p > .8$).

Zu erkennen ist weiterhin, dass das Ausmaß an Veränderungsblindheit (AVB) in der dynamischen Bedingung ($AVB_d=85\%$) durchschnittlich deutlich größer war ($F_{1,12} = 41,935$; $p<.001$) als in der statischen ($AVB_s=64\%$). Das Ausmaß wurde für jede Blank-Bedingung nach folgender Formel berechnet:

$$AVB = 100 - \frac{\text{Entdeckungsrate (Blank)} \times 100}{\text{Entdeckungsrate (Vergleichsbedingung)}}$$

Die Entdeckungszeiten (Abbildung 6.5 B) zeigen, dass durch einen Blank verdeckte Veränderungen auch deutlich später entdeckt (statisch: 348 ms; dynamisch: 483 ms) wurden als nicht verdeckte (statisch: $F_{3,12} = 25,054$; $p<.001$; dynamisch: $F_{3,10} = 50,573$; $p<.001$). Die einzelnen Blank-Dauern unterschieden sich in der statischen Umgebung (alle Vergleiche: $p>.5$) nicht voneinander. In der dynamischen Umgebung stieg die Entdeckungszeit mit zunehmender Blank-Dauer. Es zeigten sich Unterschiede zwischen dem 40 ms und dem 160 ms Blank ($p<.04$), dem 160 ms und dem 320 ms Blank ($p<.02$) und am stärksten zwischen dem 40 ms und dem 320 ms Blank ($p<.002$). Zwischen der statischen und dynamischen Bedingung zeigten sich im Allgemeinen keine Unterschiede in der Entdeckungszeit ($F_{1,10} = 1,077$; $p>.3$).

6.3.3 Art der Veränderung

Abbildung 6.6 zeigt die Entdeckungsrate bei statischem (A) und bei dynamischem (B) Stimulusmaterial, jeweils für die einzelnen Unterbrechungsdauern (und die Kontrollbedingung) und getrennt danach, ob ein Würfel verschwunden (Subtraktion) oder aufgetaucht (Addition) ist.

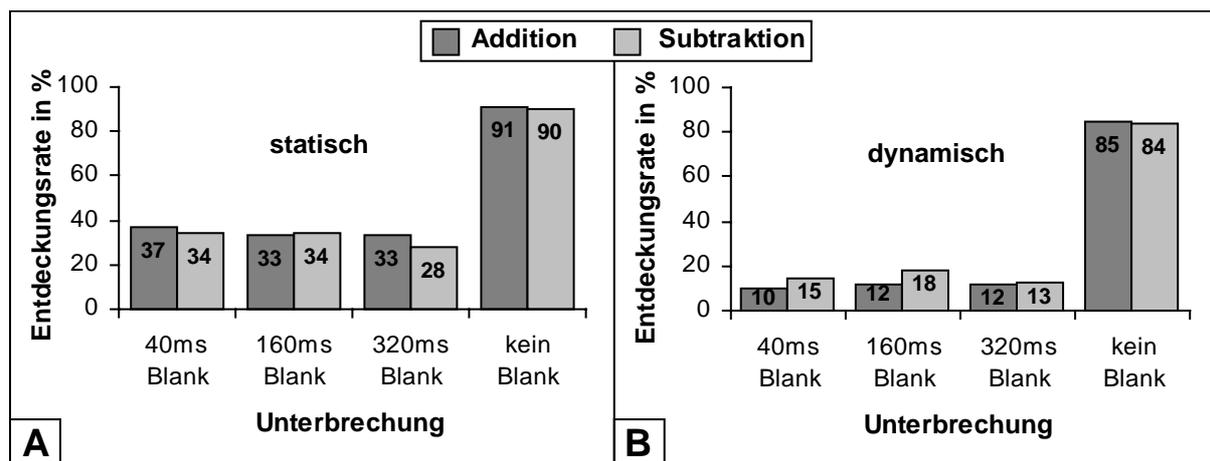


Abbildung 6.6. (A) Entdeckungsrate nach Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung in der statischen Umgebung (B) Entdeckungsrate nach Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung in der dynamischen Umgebung.

Die Art der Veränderung wirkte sich in der statischen Umgebung nicht auf die Entdeckungsrates aus ($F_{1,12} = 0,858$; $p > .3$), d.h. Additionen und Subtraktionen wurden gleich häufig entdeckt. Die Entdeckungsrates für Veränderungen in den einzelnen Blank-Bedingungen unterschieden sich auch hier nicht voneinander, weder bei den Subtraktionen, noch bei den Additionen (alle Vergleiche: $p > .4$).

Auch in der dynamischen Umgebung unterschieden sich die Entdeckungsrates von Additionen und Subtraktionen nicht ($F_{1,12} = 1,125$; $p > .2$). Zwischen den Blank-Bedingungen zeigten sich für beide Arten der Veränderung hinsichtlich der Entdeckungsrates keine Unterschiede (alle Vergleiche: $p > .7$).

Abbildung 6.7 zeigt die Entdeckungszeiten bei statischem (A) und bei dynamischem (B) Stimulusmaterial, wieder getrennt nach Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung.

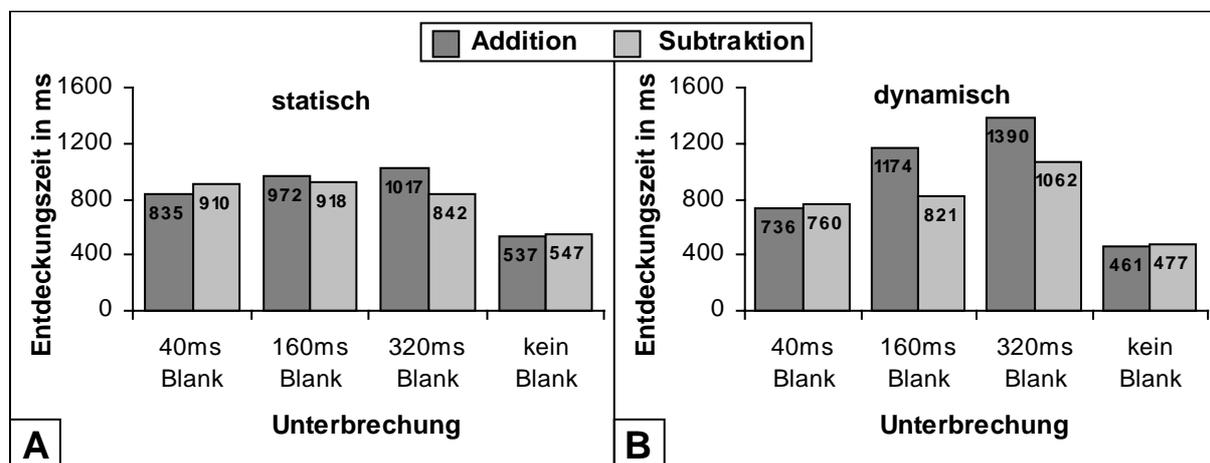


Abbildung 6.7. (A) Entdeckungszeit nach Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung in der statischen Umgebung (B) Entdeckungszeit nach Unterbrechungsdauer und Art der Veränderung in der dynamischen Umgebung.

Wir fanden auch bezüglich der Entdeckungszeit keinen Unterschied zwischen den beiden Arten der Veränderung, weder in der statischen ($F_{1,11} = 0,677$; $p > .4$) noch in der dynamischen ($F_{1,6} = 3,020$; $p > .1$) Umgebung. Die einzelnen Blank-Dauern unterschieden sich in der statischen Bedingung, sowohl bei den Additionen als auch bei den Subtraktionen, nicht voneinander (alle Vergleiche: $p > .2$).

In der dynamischen Bedingung unterschieden sich bei den Additionen die Entdeckungszeiten zwischen 40 ms und 160 ms Blanks sowie zwischen den 160 ms und 320 ms Blanks nicht voneinander (alle Vergleiche: $p > .4$), Additionen, die während 40 ms Blanks stattfanden, wurden jedoch schneller entdeckt als die, die während 320 ms Blanks dargeboten wurden ($p < .005$). Bei den Subtraktionen ergab sich ein analoges Bild: 40 ms und 160 ms Blanks so-

wie 160 ms und 320 ms Blanks unterschieden sich nicht voneinander (alle Vergleiche: $p > .09$), zwischen 40 ms und 320 ms Blanks zeigte sich ein Unterschied ($p < .05$).

6.3.4 Lokalisation vs. Identifikation

Abbildung 6.8 zeigt die Daten der Bildschirmbefragung zur Erinnerungsleistung von Lokalisation und Identifikation, die im statischen und dynamischen Versuchsteil jeweils nach einem Durchgang erhoben wurden.

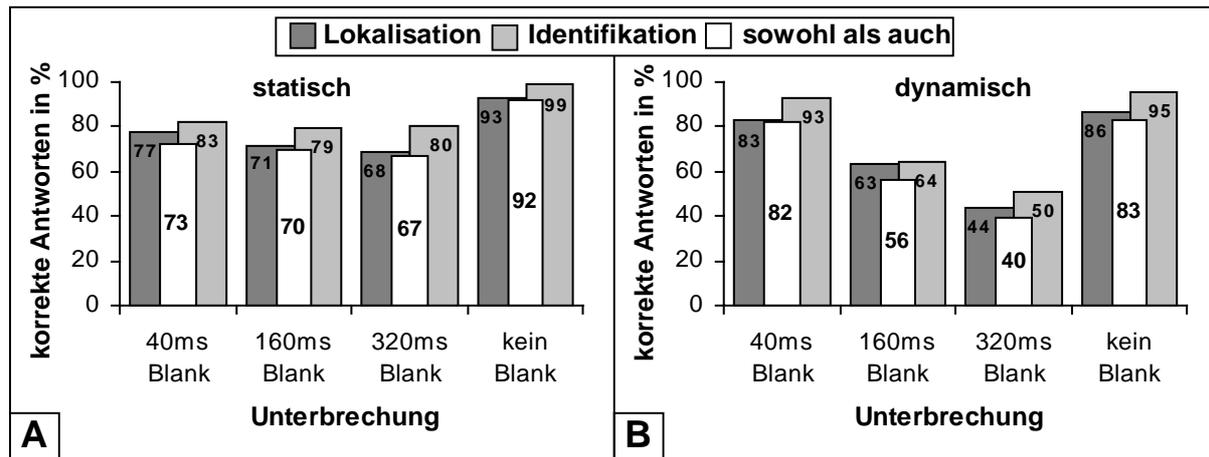


Abbildung 6.8. Korrekte Erinnerungsleistungen bzgl. der Lokalisation und/oder Identifikation der Veränderung bei (A) statischem und (B) dynamischem Material.

In die Auswertung flossen jeweils alle korrekten Antworten auf die Fragen nach dem Ort (links, mittig, rechts) und der Art der Veränderung (Addition, Subtraktion) ein, vorausgesetzt die bereits während des Durchgangs durch Knopfdruck rückgemeldete Entdeckung der Veränderung wurde erneut bestätigt. Obwohl der Prozess der Identifikation auf dem der Lokalisation aufbaut (siehe Abschnitt 2.4), setzten wir aus zweierlei Gründen für eine erfolgreiche Identifizierung keine vorangegangene Lokalisierung voraus. Zum Einen wurde nicht der unmittelbare Verarbeitungsprozess analysiert (wie bei Experiment 1 und 2), sondern die Erinnerungsleistung. Da also Gedächtnisprozesse abgefragt wurden, ist es möglich und kein Artefakt, dass trotz einer falschen Erinnerung des Ortes der Veränderung (Lokalisation) die Art der Veränderung (Identifikation) korrekt erinnert wird. Zum Anderen handelt es sich bei der hier untersuchten Art der Veränderung, wie bereits erwähnt, um eine abgeschwächtere und weniger trennscharfe Form der Identifikation (vgl. Abschnitt 6.2.2). Zum Vergleich zeigen die weißen Säulen in Abbildung 6.8 die Fälle, in denen sich die Probanden sowohl an den Ort als auch an die Art der Veränderung korrekt erinnerten.

Sowohl der Ort als auch die Art Veränderung wurden in der statischen Bedingung im Vergleich zur unverdeckten Kontrollbedingung immer schlechter erinnert, wenn die Veränderung während eines Blanks stattfand (Lokalisation: $F_{3,12} = 13,717$; $p < .001$; Identifikation: $F_{3,12} = 10,628$; $p < .001$). Die einzelnen Blank-Bedingungen unterschieden sich nicht in der Häufigkeit der korrekten Antworten, weder bei der Lokalisation noch bei der Identifikation (alle Vergleiche: $p > .1$).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse für die dynamische Bedingung, dass sowohl die Erinnerungsleistung des Ortes ($F_{3,10} = 8,669$; $p < .001$) als auch die der Art einer Veränderung ($F_{3,10} = 12,769$; $p < .001$) für Veränderungen, die während eines 160 ms oder eines 320 ms Blanks stattfanden, schlechter waren als in der Kontrollbedingung. Die Erinnerungsleistungen für Veränderungen, die während eines 40 ms Blanks dargeboten wurden, unterschieden sich nicht von denen der Kontrollbedingung (Lokalisation: $p > .5$; Identifikation: $p > .05$). Hinsichtlich des Ortes der Veränderung zeigte sich eine schlechtere Erinnerungsleistung für Veränderungen, die während 320 ms Blanks dargeboten wurden als für Veränderungen, die während 160 ms oder 40 ms Blanks stattfanden (alle Vergleiche: $p < .02$), wobei sich die Erinnerungsleistungen für Veränderungen, die während 160 ms oder 40 ms Blanks dargeboten wurden, nicht voneinander unterschieden ($p > .1$). Die Art der Veränderung wurde bei, durch 320 ms Blanks verdeckten, Veränderungen schlechter erinnert als bei durch 160 ms Blanks verdeckten und bei diesen wiederum schlechter als bei durch 40 ms Blanks verdeckten Veränderungen (alle Vergleiche: $p < .03$).

In dynamischer Umgebung war die Erinnerung der Lokalisation und Identifikation, abgesehen von Veränderungen, die während eines 40 ms Blank stattfanden, immer schlechter als in der statischen (Lokalisation: $F_{1,10} = 10,053$; $p < .02$; Identifikation: $F_{1,10} = 5,624$; $p < .04$).

Schließlich konnten sich die Probanden in statischer Umgebung generell besser an die Art als an den Ort der Veränderung erinnern ($F_{1,12} = 25,337$; $p < .001$), während in der dynamischen Umgebung kein entsprechender Unterschied gefunden wurde ($F_{1,10} = 4,015$; $p > .07$). Insgesamt ging einer richtig erinnerten Identifikation in der überwiegenden Mehrheit der Fälle auch eine richtige Lokalisation voraus (siehe weiße Balken).

6.3.5 Implizite Erkennung in statischer Umgebung

Nach jedem Durchgang sollten die Probanden, unabhängig davon, ob sie zuvor eine Veränderung durch Knopfdruck rückgemeldet hatten oder nicht, mittels Bildschirmbefragung bestätigen, ob eine Veränderung entdeckt wurde. Nach einer Beantwortung mit „Nein“ sollten sie

nur in der statischen Bedingung dennoch raten, wo und auf welche Art die Veränderung stattfand. Ein überzufällig richtiges Raten des Ortes und der Art der Veränderung sollte Aufschluss über eine mögliche implizite Erkennung geben.

In die Auswertung gingen alle Durchgänge ein, bei denen es nach einer Veränderung nicht zu einer Rückmeldung dieser durch einen Knopfdruck kam und die anschließende Frage „Veränderung bemerkt?“ mit „Nein“ beantwortet wurde. Die Prüfung, ob jeweils überzufällig häufig der richtige Ort und die richtige Art der Veränderung erraten wurde, erfolgte mittels Chi-Quadrat-Anpassungstests. Die Wahrscheinlichkeit, zufällig den richtigen Ort der Veränderung (links, mittig, rechts) zu erraten, lag bei 1:3. Somit sind relative Häufigkeiten über 33% als überzufällig zu bewerten und lassen auf implizite Erkennung des Ortes der Veränderung schließen. Die jeweiligen Rateleistungen für den Ort der Veränderung sind in Tabelle 6.1. angegeben.

Tabelle 6.1. Relative Häufigkeiten der Rateleistung des Ortes der Veränderung.

Einschätzung Zustand		Wo ist die Veränderung aufgetreten?		
		Links	Mitte	Rechts
Ort der Veränderung	Links	richtig (42,8%)	falsch (34,3%)	falsch (22,9%)
	Mitte	falsch (30,5%)	richtig (44,4%)	falsch (25,1%)
	Rechts	falsch (26,9%)	falsch (37,2%)	richtig (35,9%)

Die Analysen ergaben, dass Veränderungen, die links ($\chi^2_{(2)} = 26,174$; $p < .001$) oder mittig ($\chi^2_{(2)} = 18,450$; $p < .001$) dargeboten wurden, überzufällig häufig richtig geraten wurden. Rechts dargebotene Veränderungen wurden auch überzufällig häufig richtig, aber auch überzufällig häufig mittig geraten ($\chi^2_{(2)} = 8,591$; $p < .02$).

Die jeweiligen Rateleistungen für die Art der Veränderung zeigt Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2. Relative Häufigkeiten der Rateleistung der Art der Veränderung.

Einschätzung Zustand		Welcher Art war die Veränderung?	
		Subtraktion	Addition
Art der Veränderung.	Subtraktion	richtig (67,6%)	falsch (32,4%)
	Addition	falsch (48,7%)	richtig (51,3%)

Die Wahrscheinlichkeit, zufällig die richtige Art der Veränderung (Addition, Subtraktion) zu erraten, lag bei 1:2. Relative Häufigkeiten von über 50% sind hier als überzufällig und als Indiz für eine implizite Erkennung zu werten. Die Ergebnisse zeigen, dass Subtraktionen überzufällig häufig richtig erraten wurden ($\chi^2_{(1)} = 76,235$; $p < .001$). Bei der Addition von Veränderungen kann von zufälligen Rateleistungen ausgegangen werden ($\chi^2_{(1)} = 0,379$; $p > .5$).

6.4 Abschließende zusammenfassende Diskussion

Wir fanden, wie erwartet, sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Bedingung Effekte klassischer Veränderungsblindheit, also eine geringere Entdeckungsrate bei Veränderungen, die während einer Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung dargeboten wurden, verglichen mit der unverdeckten Kontrollbedingung. Auch entsprechend unserer Erwartungen wurden verdeckte Veränderungen sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Bedingung langsamer entdeckt als in der Kontrollbedingung. Dass wir den Blank-Vorteil aus Experiment 2 in der dynamischen Bedingung nicht replizieren konnten, bestätigt uns in der Annahme, dass dieser durch Merk- bzw. Abzählstrategien zustande kam. Die Nutzung solcher Strategien wurde in Experiment 3 durch die Verbesserung des Versuchsdesigns praktisch ausgeschlossen. Bei dem erstmals möglichen direkten Vergleich bestätigte sich darüber hinaus unsere Annahme, dass das Ausmaß der Veränderungsblindheit in der dynamischen Umgebung größer ist als in der statischen (85% vs. 64%), was sich bereits beim Vergleich von Experiment 1 und Experiment 2 andeutete. Dieser Befund stützt frühere Ergebnisse von Simons (1996) und Wallis & Bühlhoff (2000), die zwar methodisch nicht mit unseren vergleichbar (siehe hierzu Abschnitt 3.2), aber ebenso plausibel sind: Im Vergleich zur statischen Bedingung, in der die Inhalte zweier einzelner Bilder in einem Zeitraum von mehreren Sekunden verarbeitet werden können, wird dem Gehirn in einer dynamischen Bedingung eine ungleich größere Rechenleistung abverlangt. Eine Serie von Einzelbildern (25 Vollbilder pro Sekunde) muss aktiv zu einer Bewegungswahrnehmung „geformt“ werden (Phi-Phänomen - Wertheimer, 1912). Unter weiterem kognitivem Aufwand muss nun aus zahlreichen ablenkenden Bewegungssignalen das Relevante, also die Veränderung, isoliert werden. In einer statischen Bedingung hingegen markiert lediglich ein einziges Bewegungssignal die Veränderung. In Verbindung mit der ohnehin geringeren Rechenleistung wird so die Entdeckung von Veränderungen in einer statischen Bedingung begünstigt. Dieser Vorteil muss sich jedoch nicht in der Entdeckungszeit niederschlagen. Auf entdeckte Veränderungen wurde in statischer und dynamischer Umgebung gleich schnell reagiert. Der beschriebene Unterschied im Ausmaß der Veränderungsblindheit verdeutlicht jedenfalls, dass es nicht ohne weiteres mög-

lich ist, Ergebnisse aus Studien zur Veränderungsblindheit, die in statischen Umgebungen gewonnen wurden, auf dynamische Umgebungen zu übertragen.

Bei den einzelnen Unterbrechungsdauern zeigte sich erwartungsgemäß, dass sich diese hinsichtlich der Entdeckungsrate sowohl in der statischen als auch in der dynamischen Bedingung nicht unterscheiden. Ein differenzierteres Bild ergab sich bei den Entdeckungszeiten. Hier zeigten sich in der statischen Bedingung erwartungsgemäß keine Unterschiede, in der dynamischen Bedingung hingegen dauerte eine Entdeckung mit zunehmender Blank-Dauer länger. Die Ergebnisse in der statischen Bedingung decken sich mit denen von Experiment 1, die zeigten, dass sich in statischer Umgebung Unterbrechungsarten mit einer mittleren Dauer von 30 ms bis 154 ms nicht auf Entdeckungswahrscheinlichkeit und Entdeckungszeit auswirken. Dies spricht gegen frühere Ergebnisse von Phillips & Singer (1974) sowie Stelmach et al. (1984), die bei künstlichem Stimulusmaterial eine Verschlechterung der Entdeckung mit steigender Dauer der Unterbrechung feststellten und steht im Einklang mit neueren Ergebnissen, die in natürlicherer Umgebung gewonnen wurden (z.B. Simons, 1996; Henderson & Hollingworth, 2003; Hollingworth & Henderson, 2003). Womöglich ist es in einer natürlicheren und dadurch vertrauteren statischen Umgebung einfacher, eine längere Unterbrechung der visuellen Wahrnehmung zu überbrücken als in einer im Alltag eher seltenen vorkommenden, abstrakten statischen Umgebung. Diese Annahme ließe sich einzig durch die Variation der Natürlichkeit der Umgebung bei unterschiedlichen Unterbrechungsdauern überprüfen. In dynamischer Umgebung wirkte sich die Unterbrechungsdauer zwar nicht auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit und somit auch nicht auf Veränderungsblindheit per se aus. Die Entdeckungszeit erwies sich hier mit Unterschieden zwischen allen Blank-Dauern jedoch als vergleichsweise sensibler Faktor, der zusätzliche Informationen über kognitive Zustände liefern kann. Wertvoll ist die Entdeckungszeit vor allem deshalb, weil sie genauere Abstufungen zulässt als die reine Ja/Nein-Entscheidung bei der einfachen Entdeckung. Dies macht es plausibel, dass sich spezifisches Verhalten schon in der sensibleren Entdeckungszeit zeigen kann, bevor es sich bei einer stärkeren oder neuen Manipulation der unabhängigen Variablen auch in der Entdeckungsrate niederschlagen würde (z.B. bei der „Erweiterung“ der Unterbrechungsdauer oder Variation der Set Size). Qualitative Unterschiede zwischen Entdeckungswahrscheinlichkeit und Entdeckungszeit sind nicht ungewöhnlich. Sie zeigen sich in statischer Umgebung z.B. bei Untersuchungen zur Semantik (z.B. Davies & Hoffman, 2002; Kelly et al., 2003) und in unserer dynamischen Umgebung beim beschriebenen Ausmaß der Veränderungsblindheit und müssen nicht zwingend in dieselbe Richtung weisen. Ein genauerer Aufschluss über das Verhältnis der beiden Maße wird leider dadurch erschwert, dass unseres

Wissens nach nur die wenigsten Studien mit statischem und bisher keine mit dynamischem Material sowohl über Entdeckungswahrscheinlichkeit als auch über Entdeckungszeit berichten. Im Allgemeinen bestätigen die Ergebnisse unsere Annahme, dass sich Blanks bei Untersuchungen zur klassischen Veränderungsblindheit gut zur Simulation von natürlichen Unterbrechungen der visuellen Wahrnehmung eignen – nicht nur in statischer, sondern auch in dynamischer Umgebung und bis zu einer Dauer von 320 ms. Dennoch zeigt das differenziertere Maß der Entdeckungszeit, dass eine zunehmende Unterbrechungsdauer in der komplexeren dynamischen Umgebung einen negativen Einfluss auf die Qualität der Entdeckung hat. Die Ergebnisse aus Experiment 2 werden letztlich erneut in Frage gestellt, da die Dauer der Unterbrechung als mögliche Erklärung für eine „bessere“ Entdeckung in einer dynamischen Umgebung durch die nun vorliegenden Ergebnissen sehr unwahrscheinlich erscheint.

Additionen und Subtraktionen wurden sowohl in statischer als auch in dynamischer Umgebung gleich gut und gleich schnell entdeckt. Erwartet hatten wir jedoch einen Vorteil für Additionen. Wir führen diesen Unterschied zu Experiment 1, in dem sich ein deutlicher Vorteil für Additionen zeigte, vor allem darauf zurück, dass in dem hier diskutierten dritten Experiment alle potentiellen Veränderungsobjekte bekannt und in Form, Farbe, Größe und Orientierung identisch waren. Die damit zwangsläufig verbundene Künstlichkeit könnte darüber hinaus die Entstehung des, von uns in Experiment 1 postulierten, verborgenen Relevanzeffektes hemmen. Die Objekte in den statischen Versuchen von Phillips & Singer (1974) und Stelmach et al. (1984) waren zwar auch identisch und dort zeigte sich ein Vorteil für Additionen, insgesamt war deren Stimulusmaterial jedoch nicht mit unserem vergleichbar (zweidimensional, einfarbiger Hintergrund). Dennoch wäre es interessant in zukünftigen Experimenten zu überprüfen, ob die von uns gefundenen Effekte z.B. auch bei einer insgesamt höheren Entdeckungsrate (z.B. bei geringerer Set Size) bestehen bleiben. Schließlich werfen unsere Ergebnisse die Frage auf, inwieweit Faktoren wie Größe, Form, Orientierung und Erfahrung die zum Teil sehr widersprüchlichen Ergebnisse zur Art der Veränderung in bisherigen Untersuchungen erklären.

Hinsichtlich der Erinnerungsleistung von Lokalisation und Identifikation bestätigte sich unsere Annahme, dass die Probanden in beiden Fällen gleich gute Leistungen zeigen, nur teilweise. In der statischen Umgebung erinnerten sich die Probanden häufiger an die Art als an der Ort der Veränderung, während sich die Leistungen in der dynamischen Umgebung erwartungsgemäß nicht unterschieden. In beiden Umgebungen führte das Wissen, dass nicht nur – wie in den beiden ersten Experimenten – so schnell wie möglich auf eine Veränderung reagiert werden soll, sondern auch auf deren Ort und Art geachtet werden soll, wahrscheinlich

dazu, dass die anspruchsvollere Identifikationsleistung nicht schlechter war als die Lokalisationsleistung. Die anspruchsvolle Instruktion schlug sich wahrscheinlich auch in den Entdeckungszeiten nieder, die in Experiment 3, verglichen mit Experiment 1 und 2, am längsten waren. Dass wir nicht wie Mondy & Coltheart (2000) Vorteile für die Lokalisation fanden, führen wir zudem darauf zurück, dass wir eine abgeschwächte Form der Identifikation – die Identität der Veränderung an sich – untersuchten. Mondy & Coltheart (2000) hingegen baten ihre Probanden nach erfolgreicher Entdeckung, die Veränderung ausführlich zu beschreiben. Dass wir in der statischen Umgebung sogar eine bessere Identifikationsleistung fanden, lässt sich darüber hinaus auf mögliche Gedächtniseffekte zurückführen: Die tiefer verarbeitete Identifikation wird besser behalten als die ihr vorangehende oberflächlichere Lokalisation (siehe hierzu auch Craik & Lockhart, 1972; Velichkovsky, 1999, 2001). Womöglich zeigen sich derartige Gedächtniseffekte häufiger in der weniger komplexen statischen Umgebung. Unsere oben beschriebenen Ergebnisse zur Veränderungsblindheit, zu deren Ausmaß und zur Unterbrechungsdauer spiegeln sich insgesamt auch in der Erinnerung der Lokalisation und Identifikation wieder.

Ebenfalls teilweise bestätigt wurden unsere Annahmen bezüglich der impliziten Erkennung, für die wir in den ersten beiden Experimenten anhand der Verlängerung der Fixationsdauer zum Zeitpunkt des Auftauchens der Veränderung deutliche Anzeichen fanden. Hier zeigte sich insgesamt, dass Veränderungen des Ortes überzufällig häufig richtig geraten wurden. Eindeutig war der Effekt jedoch nur bei links und mittig dargebotenen Veränderungen. Rechts dargebotene Veränderung wurden zwar auch überzufällig häufig richtig geraten, aber auch überzufällig häufig als mittig, also falsch, eingeschätzt. Im Allgemeinen bestätigen unsere Ergebnisse damit die statische Untersuchung von Fernandez-Duque & Thornton (2000), in der Probanden, die Veränderungen nicht entdeckt hatten, dennoch überzufällig häufig den Ort der Veränderung richtig errieten, wenngleich bei unnatürlicherem Stimulusmaterial (schwarze Rechtecke vor weißem Hintergrund) und in der Auswertung nicht getrennt nach unterschiedlichen Orten. Die Art der Veränderung wurde in unserer Untersuchung nur im Fall der Subtraktionen überzufällig häufig richtig erraten. Dieser Vorteil gegenüber den Additionen, die nur zufällig erraten wurden, erscheint zunächst paradox, könnte aber ein Hinweis dafür sein, dass der impliziten und expliziten Wahrnehmung (bei der sich kein Unterschied bezüglich der Art der Veränderung zeigte) zwei oder mehr grundverschiedene kognitive Mechanismen zugrunde liegen. Im Rahmen von Rensinks Kohärenz Theorie (2000b, 2002) stünde z.B. System 1 und 3 für die implizite Erkennung, System 2 für die explizite Erkennung gegenüber.

Insgesamt scheint es, dass in Experiment 3, verglichen mit Experiment 1 und 2, Veränderungen am seltensten und langsamsten entdeckt wurden, was zu großen Teilen auf die Gleichheit der Stimuli (Würfel), die hohe Set Size und die konservativere Instruktion zurückzuführen sein könnte. Das in Experiment 3 ermittelte höhere Ausmaß an Veränderungsblindheit für die dynamische Umgebung, direkt verglichen mit der statischen, bleibt von diesen Variablen jedoch unbeeinflusst. Wir gehen daher und wegen der zusätzlich erschwerenden Konzentration auf die Lenkaufgabe (siehe Wallis & Bühlhoff, 2000) davon aus, dass die in Experiment 1 erörterte Gefahr in Form von Veränderungsblindheit, sich im tatsächlichen, „dynamischen“ Straßenverkehr verstärken wird und einen ernstzunehmenden Grund für zu spät oder nicht erkannte Gefahren darstellt. Mit Veränderungsblindheit wäre vor allem dann zu rechnen, wenn sich der Fahrer in einer unübersichtlichen Situation befindet, die ihm vermehrte Blick- und Kopfbewegungen abverlangt (z.B. Suchen eines Parkplatzes, einer Straße oder einer Hausnummer), er abgelenkt wird (z.B. durch den Beifahrer, Telefonieren oder Hupen), eine natürliche globale Verdeckung einer Veränderung stattfindet (z.B. ein rechtsabbiegender LKW hinter dem ein Fußgänger auf die Straße läuft oder blendendes Licht), die Sicht teilweise verdeckt wird (z.B. durch Scheibenwischer, Schnee, Regen oder Schlammspritzer) oder bei erhöhtem, die Speicherkapazität des Arbeitsgedächtnis bei weitem übersteigenden, Verkehrsaufkommen. In Zukunft sollte das Phänomen ausführlich in verkehrsbezogenem Kontext untersucht werden.

7 Ausblick und offene Fragen

Die drei in der vorliegenden Arbeit dargestellten Experimente liefern wichtige ergänzende und neue Erkenntnisse im Bereich der Veränderungsblindheit. Mit ihren zum Teil widersprüchlichen Ergebnissen (z.B. Experiment 1 vs. 2) zeigen sie deutlich, wie sensibel sich verschiedene Faktoren auf die explizite oder implizite Wahrnehmung von Veränderungen auswirken (vgl. Abschnitt 3.2) und wie wichtig aber auch schwierig es ist, diese zu erkennen und zu kontrollieren. Wir konnten z.B. zeigen, dass die Art der Instruktion (liberal vs. konservativ), die Relevanz (verkehrsrelevant vs. verkehrsirrelevant) und die Art (Addition vs. Subtraktion) der Veränderung sowie die Umgebungsbedingung (statisch vs. dynamisch) sich unterschiedlich auf die Entdeckungswahrscheinlichkeit, die Entdeckungszeit und die Art der Entdeckung (implizit vs. explizit, Identifikation vs. Lokalisation) auswirken. Es liegt auf der Hand, dass bisherige Studien zur Veränderungsblindheit nur bedingt und unter genauer Kenntnis dieser und weiterer Wirkungsfaktoren interpretiert und miteinander verglichen werden können. So steht es z.B. außer Frage, dass es sich beim Phänomen der Veränderungsblindheit im Allgemeinen um einen robusten Effekt handelt, der sich in nahezu allen Untersuchungen zeigt (siehe auch Rensink, 2002) und nach unseren Erkenntnissen relativ unabhängig von der Art (Blanks, Lidschläge, Sakkaden) und Dauer der Unterbrechung (bis zu 320 ms) zu sein scheint (dass wir in Experiment 2 keine Veränderungsblindheit fanden, führen wir auf ein suboptimales Versuchsdesign zurück - siehe Abschnitte 5.4 und 6.4). Das Ausmaß dieses Effektes aber ist nur dann von einer Untersuchung auf eine andere übertragbar, wenn sich die Untersuchungsdesigns nicht unterscheiden, was selten der Fall ist. Für die angewandte Kognitionsforschung sind aber gerade Vergleiche des Ausmaßes äußerst wichtig, um Aufschluss darüber zu erlangen, wie sensibel das unter Umständen gefährliche Wahrnehmungsphänomen (siehe Albers, 2001; Richard et al., 2002) auf einzelne Faktoren reagiert, um dann, beispielsweise im Straßenverkehr, gezielt entgegenwirken zu können. Unser direkter Vergleich von Veränderungsblindheit in statischer und dynamischer Umgebung (Experiment 3) kann dazu beitragen, die Erkenntnisse zur Veränderungsblindheit mittelfristig „aus dem Labor“ zu bringen, wenngleich wir an dieser Stelle darauf hinweisen, dass sich die Wahrnehmung beim Betrachten von Filmen nur eingeschränkt mit der Wahrnehmung in der realen Welt vergleichen lässt (Arnheim, 1956; Levin & Simons, 2000).

Um jedoch in zukünftigen Experimenten nicht erneut in das Dilemma der unterschiedlichen Designs zu gelangen, bietet sich ein universaler Ansatz in Form eines für alle zugänglichen, verwendbaren und weiterentwickelbaren Grund-Versuchsdesigns an. Mit der Programmie-

rung eines derartigen Open-Source-Tools haben wir, basierend auf den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit, begonnen und bereits erfolgreich erste Versuche durchgeführt (z.B. Helmert et al., 2003). Dieses sogenannte Dresden-Change-Blindness-Tool-Kit (DCBTK) wurde in Delphi unter Zuhilfenahme einer OpenGL-Komponente programmiert. Die Stimuli (zur Zeit zweidimensionale gelbe Scheiben vor schwarzem Hintergrund) bilden ein Stimulusfeld, das sich aus beliebigen (zur Zeit vier), in die Tiefe gestaffelten Ebenen zusammensetzt (vgl. Abbildung 7.1).

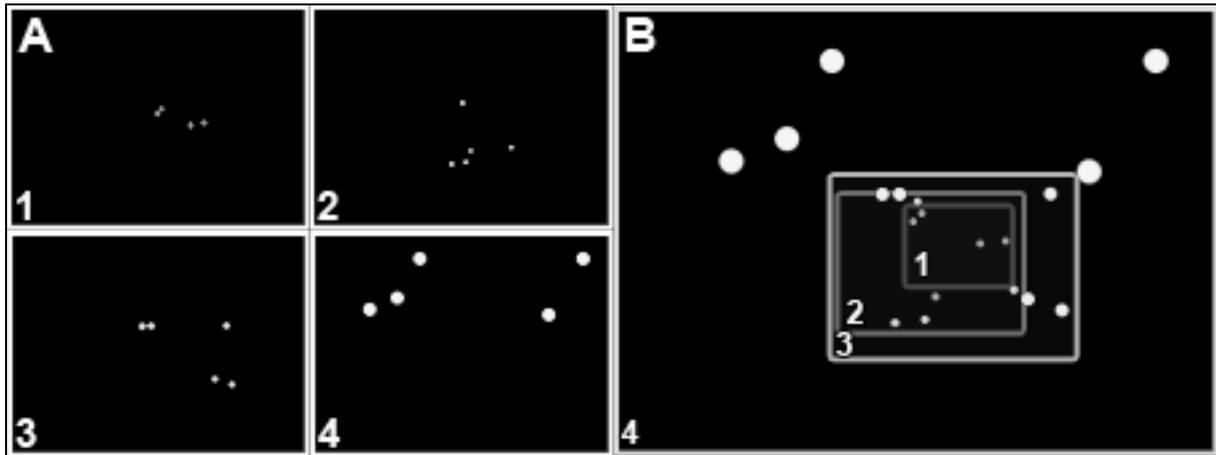


Abbildung 7.1. Stimulusfeld. (A) Aufschlüsselung der Ebenen nach ihrer Tiefe (B) Gesamtes, aus den vier Ebenen bestehendes Stimulusfeld.

In jeder dieser Ebenen gibt es eine definierte Anzahl von Stimuli bzw. Objekten. Als Objekte können prinzipiell alle geometrischen Figuren (auch Polygone) in allen Farben und Strukturen und in unterschiedlicher Größe vor beliebigem statischen oder dynamischen (gegebenenfalls strukturierten) Hintergrund verwendet werden. In der dynamischen Bedingung wird der Eindruck einer Eigenbewegung im Stimulusfeld dadurch erreicht, dass die Ebenen sich mit einer variablen Geschwindigkeit auf der z-Achse (Tiefenachse) auf den Betrachter zubewegen. Verlässt eine Ebene den Sichtbarkeitsbereich, baut sich am Horizont eine neue auf. Damit so neu entstehende Objekte nicht für zusätzliche Ablenkung sorgen, werden diese in einem festgelegten Bereich in der Tiefe langsam heller und farbiger. Jedes einzelne Objekt des Stimulusfeldes lässt sich durch Koordinaten auf einer x-, y- und z-Achse beschreiben. Die gleichförmige Bewegung der Objekte auf der z-Achse bewirkt für den Betrachter auch eine Veränderung der Position und Größe auf der x- und y-Achse. Dadurch ergibt sich, dass sich Objekte, die mit großer Exzentrizität (Abstand vom Bildschirmmittelpunkt) im Hintergrund kreiert wurden, schneller zu bewegen scheinen und auch schneller aus dem Sichtbarkeitsbereich verschwinden. Im Gegensatz dazu würde ein Objekt, das genau im Mittelpunkt entsteht, am längsten zu sehen sein und am Ende den gesamten Sichtbarkeitsbereich einnehmen. Um diese

Extremausprägungen zu kontrollieren, wird die mögliche Exzentrizität der Objekte auf einen Bereich innerhalb eines bestimmten Mindest- und Maximalwertes festgelegt. Darüber hinaus können sowohl die Anzahl der Ebenen als auch die der Objekte in den Ebenen dahingehend optimiert werden, dass Überlagerungen von Objekten so selten wie möglich auftreten. Weiter findet die Bildung neuer Objekte im Hintergrund randomisiert statt. Additionen, Subtraktionen sowie Austausch-Veränderungen können während eines variablen, beliebig farbigen oder strukturierten Blanks oder Mudsplashes sowie während eines Lidschlags oder einer Sakkade dargeboten werden. Zur Realisierung der blickkontingenten Veränderungsdarbietung wird auf der z-Achse ein Bereich (ggf. mehrere) festgelegt, innerhalb dessen Veränderungen auftreten können. Zu jedem Zeitpunkt eines Durchgangs muss sich dazu eine Ebene innerhalb dieses Bereichs befinden, so dass der Bereich mindestens den Abstands zwischen zwei Ebenen haben muss. Die statische Bedingung entspricht in allen Punkten der dynamischen, nur dass die entsprechenden Standbilder der Veränderungen verwendet werden (siehe hierzu Abschnitt 6.2.2). Derzeit ist das EyeLink-I System an die Software angebunden. Eine Anbindung an weitere Fabrikate ist möglich. Alle Blickbewegungs- und Verhaltensdaten werden in Log-Dateien gespeichert.

Abschließend erörtern wir einige Fragen, die sich unmittelbar aus unseren oben dargestellten Experimenten ergeben und mit dem beschriebenen DCBTK oder einem ähnlichem „Universalinstrument“ untersucht werden können. Zunächst sollte in einem direkten Vergleich von statischer und dynamischer Umgebung abgeklärt werden, inwieweit sich auftauchende oder verschwindende Veränderungen, die während Sakkaden oder Lidschlägen dargeboten werden, voneinander und auch von Blanks entsprechender Länge unterscheiden. Um diesbezüglich zu möglichst artefaktfreien Ergebnissen zu gelangen, empfiehlt es sich vorerst erneut mit identischen Stimuli zu arbeiten. Weiter sollten die Probanden liberal instruiert werden, so schnell wie möglich auf Veränderung zu reagieren. Um Abzählstrategien zu vermeiden, sollte in Vorversuchen sowohl die optimale Zahl der Ebenen (auf der z-Achse) als auch die optimale Set Size festgelegt werden. Informationen zur fovealen Distanz und zur impliziten Entdeckung lassen sich post hoc anhand der Augenbewegungsparmeter ermitteln, was eine anschließende Befragung einspart. Aufschluss über die Lokalisation und Identifikation von Veränderungen muss in einem getrennten Versuch, möglichst mit denselben Versuchspersonen, erlangt werden. Hier sollten für einen möglichen Vergleich sowohl in statischer als auch dynamischer Umgebung die Lokalisations- und Identifikationsleistung jeweils voneinander getrennt werden. Dazu sollte den Probanden zur Lokalisation im dynamischen Stimulusfeld oder auf den entsprechenden Standbildern während einer Sakkade, eines Lidschlages oder eines

Blanks entsprechender Länge identische Objekte dargeboten werden. Zur Identifikation sollten unterschiedliche, jedoch untereinander und mit denen zur Lokalisation möglichst vergleichbare Objekte als Stimulusmaterial verwendet werden. Veränderungen sollten entweder nur Additionen oder nur Subtraktionen sein, um auch eine mögliche Identifikation der Art in der Lokalisationsbedingung zu kontrollieren. Weiterhin sollten die Probanden nach jeder Veränderungsrückmeldung befragt werden, wo ein Objekt oder welches Objekt auftauchte (bzw. verschwand). Zur Kreuzvalidierung böte sich die anschließende Analyse der relativen Häufigkeitsverteilungen ambienter und fokaler Fixationen an. Durch die Erfassung von Entdeckungswahrscheinlichkeit und Entdeckungszeit in allen Experimenten kann deren funktionaler Zusammenhang analysiert werden. Weitere Fragen sollten mittelfristig geklärt werden: Wie wirkt sich die Relevanz von Veränderungen auf das Ausmaß von Veränderungsblindheit in statischer und dynamischer Umgebung aus? Hierzu könnte im Stimulusfeld zunächst mit einfachen, in Größe, Farbe und Form vergleichbaren Objekten gearbeitet werden, die sich z.B. hinsichtlich ihrer Verkehrsrelevanz unterscheiden. Inwieweit wirkt sich die optische Beschaffenheit eines Blanks oder der Hintergrund des Stimulusfeldes auf die Entdeckung von Veränderungen in statischen und dynamischen Umgebungen aus? Farbe, Helligkeit und Strukturierung könnten diesbezüglich systematisch variiert werden. Inwieweit wirken sich Erwartungen auf Veränderungsblindheit in statischer und dynamischer Umgebung aus? Hier könnten Hinweisreize genutzt werden, die vor einem Teil der Durchgänge z.B. den Ort einer Veränderung markieren oder in Form von eingeblendeten Worten dargeboten werden. Inwieweit unterscheiden sich Veränderungen an unbewegten (z.B. Quadrat) oder bewegten (z.B. drehendes Quadrat) Objekten in dynamischer Umgebung? Unterscheidet sich eine zweidimensionale dynamische Umgebung (z.B. sich verfolgende Kreise) von einer zweidimensionalen, die Eigenbewegung suggeriert, und wie verhält es sich in einer echten 3D-Umgebung (z.B. Rot-Grün-Bilder bei suggerierter Eigenbewegung)? Langfristig sollte in statischer und dynamischer Umgebung untersucht werden, inwieweit sich die Erfahrung des Betrachters auf die Veränderungsentdeckung auswirkt (z.B. durch die experimentelle Trennung der Fahrerfahrung bei der Darbietung von verkehrsbezogenem Stimulusmaterial), inwieweit sich das funktionale Sehfeld mit steigender Aufgabenanforderungen einengt (zur Messung und Variation des funktionalen Sehfeldes siehe Rayner, 1998), inwieweit sich graduelle Veränderungen (z.B. langsam eingeblendete Kreise) auf Veränderungsblindheit auswirken und inwieweit sich One-Shot-Paradigma, Flicker-Paradigma und Mudsplash-Paradigma voneinander unterscheiden. Weiterhin sollte in statischer und dynamischer Umgebung abgeklärt werden, in welchem Ausmaß Formen der Ablenkung, z.B. Inattentional Blindness, auditive und visuelle Distrakto-

ren (siehe hierzu auch Pannasch et al., 2001a) oder die Verlagerung der Aufmerksamkeit nach innen, die klassische Veränderungsblindheit beeinflussen. Auch von großem Interesse ist letztlich die Beantwortung der Frage, inwieweit in dynamischer Umgebung Folgebewegungen sowie Linsen- bzw. Vergenzbewegungen als weitere Formen von Augenbewegungen Veränderungsblindheit auslösen. Letztere sind nicht im Rahmen des DCBTK untersuchbar. In einem solchen, von uns derzeit geplanten Versuch sollten Filme dargeboten werden, in denen sich während einer Schärfeverlagerung der Kamera von einem Objekt in der Tiefe auf ein Objekt in der Nähe (oder umgekehrt) eines dieser Objekte verändern kann.

Die systematische Beantwortung dieser Fragen kann wichtige Informationen für die Grundlagenforschung, aber auch für den Anwendungsbereich liefern. So kann z.B. die Analyse von Lokalisation und Identifikation von Veränderungen sowie die Analyse impliziter Veränderungswahrnehmung für den z.B. von Rensink (2000b, 2002) im Rahmen seiner Kohärenztheorie vertretenen Multilevel-Ansatz der visuellen Wahrnehmung (siehe auch Velichkovsky, 1990, 1994, 2002) wertvolle Hinweise auf qualitativ unterscheidbare, zugrundeliegende kognitive Mechanismen liefern. Das Flicker-Paradigma könnte als Verfahren zur Messung der Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit genutzt werden (Richard et al., 2002) – ohne die Erhebung von Augenbewegungen. Weitere Informationen über das Ausmaß von Veränderungsblindheit in dynamischer Umgebung und die sich gegebenenfalls daraus ergebende Gefahr, können zur Entwicklung von entsprechenden Gegenmaßnahmen führen. Zum Beispiel zu „flackernden“ Bremslichtern im Straßenverkehr, die durch die wiederholte Erzeugung von Bewegungssignalen die Aufmerksamkeit auf sich ziehen (Albers, 2001). Menschen, die unter großem Druck viele Informationen gleichzeitig verarbeiten müssen, z.B. Techniker in einem Kernkraftwerk, könnte man wiederum durch die Eindämmung von Bewegungssignalen entgegenkommen: Hier sollten nur wirklich wichtige Warnlampen blinken (Albers, 2001).

8 Literatur

- Aginsky, V., & Tarr, M.J. (2000). How are different properties of a scene encoded in visual memory? *Visual Cognition*, 7 (1-3), 147-162.
- Agostinelli, G., Sherman, S.J., Fazio, R.H., & Hearst, E.S. (1986). Detecting and identifying change: Additions versus deletions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12 (4), 445-454.
- Albers, M. (2001). Hier gibt's nichts zu sehen. *Süddeutsche Zeitung Magazin*, 24, 10-14.
- Allport, A. (1992). Attention and control: Have we been asking the wrong questions? A critical review of twenty-five years. In D.E. Meyer & S. Kornblum, *Attention and performance*, XIV (183–218). Cambridge: MIT Press.
- Alm, H., & Nilsson, L. (1995). The effects of a mobile telephone task on driver behaviour in a car following situation. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 27 (5), 707-715.
- Angelone, B.L., Levin, D.T., & Simons, D.J. (2003). The roles of representation and comparison failures in change blindness. *Perception*. 32, 947-962.
- Archambault, A., O'Donnell, C., & Schyns, P.G. (1999). Blind to object changes: When learning the same object at different levels of categorization modifies its perception. *Psychological Science*, 10 (3), 249-255.
- Arnheim, R. (1957). *Film as Art*. Berkeley, Ca: University of California Press.
- Austen, E.L., & Enns, J.T. (2000). Change Detection: Paying Attention To Detail. *Psyche* 6 (11). <<http://psyche.cs.monash.edu.au/v6/psyche-6-11-austen.html>> (Stand: 01.10.2000, Abfrage am 04.08.2003).
- Austen, E.L., & Enns, J.T. (2003). Change detection in an unattended face depends on the expectation of the observer. *Journal of Vision*, 1 (7), 64-74.
- Ballard, D.H., Hayhoe, M.M., Pook, P.K., & Rao, R.P. (1997). Deictic codes for the embodiment of cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 723–767.
- Barbato, G., Ficca, G., Muscettola, G., Fichelle, M., Beatrice, M., & Rinaldi, F. (2000). Diurnal variation in spontaneous eye-blink rate. *Psychiatry Research*, 93 (2), 145-151.

-
- Barenholtz, E., Cohen, E.H., Feldman, J., & Singh, M. (2003). Detection of change in shape: An advantage for concavities. *Cognition*, 89 (1), 1-9.
- Bartlett, F.C. (1932). *Remembering: A Study in Experimental and Social Psychology*. New York: Cambridge University Press.
- Becker, W. (1991). Saccades. In R.H.S. Carpenter. *Eye Movements, Vision and Visual Dysfunction* (Vol. 8, 95-137). London: Macmillan Press.
- Biederman, I. (1981). On the semantics of a glance at a scene. In M. Kubovy & J.R. Pomerantz, *Perceptual Organization* (213–253). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Birnbaumer, N., & Schmidt, R.F. (1991). *Biologische Psychologie* (2. Auflage). Berlin: Springer.
- Blackmore, S.J., Brelstaff, G., Nelson, K., & Troscianko, T. (1995). Is the richness of our visual world an illusion? Transsaccadic memory for complex scenes. *Perception*, 24, 1075–1081.
- Blumenthal, T., & Goode, C. (1991). The startle eyeblink response to low intensity acoustic stimuli. *Psychophysiology*, 28 (3), 296-306.
- Bollmann, M. (1999). *Entwicklung einer Aufmerksamkeitssteuerung für ein aktives Sehsystem*. Dissertation, Fakultät Informatik, Universität Hamburg.
- Breitmeyer, B. (1984). *Visual masking: An integrative approach*. New York: Oxford University Press.
- Bridgeman, B., & Mayer, M. (1983). Failure to integrate visual information from successive fixations. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 21 (4), 285– 286.
- Bridgeman, B., Hendry, D., & Stark, L. (1975). Failure to detect displacements of the visual world during saccadic eye movements. *Vision Research*, 15, 719-722.
- Bridgeman, B., Van der Heijden, A.H.C., & Velichkovsky, B.M. (1994). A theory of visual stability across saccadic eye movements. *Behavioral and Brain Sciences*, 17 (2), 247-258.
- Buswell, G.T. (1935). *How People Look at Pictures*. Chicago: University of Chicago Press.

-
- Buys, E., & Coppez, H. (1909). Graphic records of nystagmus. *Ophthalmoscope*, 7, 808-812.
- Carpenter, R.H.S. (1988). *Movements of the Eyes* (2nd Edition). London: Pion.
- Cave, K.R., & Bichot, N.P. (1999). Visuo-spatial attention: Beyond a spotlight model. *Psychonomic Bulletin and Review*, 6, 204-223.
- Chase, W.G., & Simon, H.A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Cherry, E.C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25 (5), 975-980.
- Chioran, G.M., & Yee, R.D. (1991). Analysis of electro-oculographic artifact during vertical saccadic eye movements. *Graefe's Archive of Clinical & Experimental Ophthalmology*, 229, 237-241.
- Chun, M.M., & Nakayama, K. (2000). On the functional role of implicit visual memory for the adaptive deployment of attention across scenes. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 65-81.
- Clark, A. (2002). Is seeing all it seems? Action, reason and the grand illusion. *Journal of Consciousness Studies*, 9 (5-6), 181-202.
- Cole, G.G., Kentridge, R.W., Gellately, A.R.H., & Heywood, C.A. (2003). Detectability of onsets versus offsets in the change detection paradigm. *Journal of Vision*, 1 (3), 22-31.
- Craik, F.I.M., & Lockhart, R.S. (1972). Levels of processing: A framework of memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 11, 671-684.
- Crane, H.D., & Steele, C.M. (1978). Accurate three-dimensional eyetracker. *Applied Optics*, 17 (5), 691-705.
- Crundall, D.E., & Underwood, G. (1998). Effects of experience and processing demands on visual information acquisition in drivers. *Ergonomics*, 41, 448-458.
- Davies, T.N., & Hoffman, D.D. (2002). Attention to faces: A change blindness study. *Perception*, 31 (9), 1123-46.
- de Groot, A.D. (1965). *Thought and Choice in Chess*. The Hague: Mouton.
- Dennett, D.C. (1991). *Consciousness Explained*. Boston: Little, Brown and Company.

- Deubel, H. (1994). Visuelle Verarbeitung und kognitive Faktoren bei der Generierung sakkadischer Augenbewegungen. In W. Prinz & B. Bridgeman, *Enzyklopädie der Psychologie, Band C/II/1: Wahrnehmung* (189-253). Göttingen: Hogrefe.
- Deubel, H., & Schneider, W.X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision Research*, 36, 1827–1837.
- Deubel, H., Schneider, W.X., & Bridgeman, B. (1996). Post-saccadic target blanking prevents saccadic suppression of image displacement. *Vision Research*, 36, 985-996.
- Deubel, H., Schneider, W.X., & Bridgeman, B. (2002). Transsaccadic memory of position and form. In J. Hyönä, D. Munoz, W. Heide & R. Radach, *The Brain's Eyes: Neurobiological and Clinical Aspects of Oculomotor Research, Progress in Brain Research* (165-180). Oxford: Elsevier.
- Deubel, H., Bridgeman, B., & Schneider, W.X. (im Druck). Different effects of eyelid blinks and target blanking on saccadic suppression of displacement. *Perception & Psychophysics*.
- Diamond, M.R., Ross, J., & Morrone, M.C. (2000). Extraretinal control of saccadic suppression. *Journal of Neuroscience*, 20, 3449–3455.
- DiLollo, V. (1980). Temporal integration in visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 75–97.
- Ditchburn, R.W. (1955). Eye-movements in relation to retinal action. *Optica Acta*, 1, 171–176.
- Ditchburn, R.W., & Ginsborg, B.L. (1952). Vision with a stabilized retinal image. *Nature*, 170, 36-37.
- Dmytryk, E. (1984). *On Film Editing: An Introduction to the Art of Film Construction*. Boston: Focal Press.
- Dodge, R. (1900). Visual perception during eye movement. *Psychological Review*, 7, 454-465.
- Dodge, R. (1903). Five types of eye movements in the horizontal meridian plane of the field of regard. *American Journal of Physiology*, 8, 307-329.

- Dodge, R., & Cline, T.S. (1901). The angle velocity of eye movements. *Psychological Review*, 8, 145-157.
- Donders, F.C. (1847). Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschlichen Auges. *Holländische Beiträge zu den anatomischen und physiologischen Wissenschaften*, 1, 104-145.
- Dornhöfer, S.M., & Pannasch, S. (2000). Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Online-Registrierung von Blickbewegungsparametern. Marburg: Tectum Verlag.
- Dornhöfer, S.M., Pannasch, S., Velichkovsky, B.M., & Unema, P.J.A. (2000). "Attentional landscapes" and phasic changes of fixation duration in picture perception. *Perception*, 29, 11-12.
- Dornhöfer, S.M., Unema, P.J.A., & Velichkovsky, B.M. (2002). Blinks, Blanks and Saccades: How Blind We Really are for Relevant Visual Events. In J. Hyönä, D. Munoz, W. Heide & R. Radach, *The Brain's Eyes: Neurobiological and Clinical Aspects of Oculomotor Research*, Progress in Brain Research (119-131). Oxford: Elsevier.
- Dornhöfer, S.M., Franke, R., Gaber, T.J., Rothert, A., & Velichkovsky, B.M. (2003). On change blindness in natural scenes: Towards a direct comparison of static and dynamic conditions. *Perception*, 32, 169.
- Dornhöfer, S.M., Helmert, J., Rothert, A., Unema, P.J.A., & Velichkovsky, B.M. (2004). Veränderungsblindheit im Straßenverkehr. In B. Schlag, *Verkehrspsychologie. Mobilität - Verkehrssicherheit – Fahrerassistenz* (219-234). Berlin: Pabst Science Publishers.
- Eriksen, C.W., & Hoffman, J. (1973). The extend of processing of noise elements during selective encoding from visual displays. *Perception and Psychophysics*, 14, 155-160.
- Farah, M.J., Tanaka, J.W., & Drain, H.M. (1995). What causes the face inversion effect? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 628–634.
- Ferman, L., Collewyn, H., Jansen, T.C., & van der Berg, A.V. (1987). Human gaze stability in the horizontal, vertical and torsional direction during voluntary head movements. *Vision Research*, 27, 939-951.

-
- Fernandez-Duque, D., & Thornton, I.M. (2000). Change detection without awareness: Do explicit reports underestimate the representation of change in the visual system? *Visual Cognition*, 7 (1-3), 324-344.
- Fischer, B., & Breitmeyer, B. (1984). Human express saccades: Extremely short reaction times of goal directed eye movements. *Experimental Brain Research*, 57, 191-195.
- Friedman, A. (1979). Framing pictures: The role of knowledge in automatized encoding and memory for gist. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108 (3), 316– 355.
- Galley, N. (1993). The evaluation of the electrooculogram as a psychophysiological measuring instrument in the driver study of driver behaviour. *Ergonomics*, 36, 1063-1070.
- Galley, N. (2001). Physiologische Grundlagen und Meßmethoden der Okulomotorischen Aktivität. In F. Rösler, *Enzyklopädie der Psychologie, Band 4: Psychophysiologie (Biologische Psychologie)* (237-315). Göttingen: Hogrefe.
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory and Cognition*, 26, 263–276.
- Gee, A., & Cipolla, R. (1996). Fast visual tracking by temporal consensus. *Image and Vision Computing*, 14 (2), 105-114.
- Gibson, J.J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Goldberg, M.E., Eggers, H.M., & Gouras, P. (1991). The ocular motor system. In E.R. Kandel, J.H. Schwartz & T.M. Jessel, *Principles of Neural Science* (660-678). New York: Elsevier.
- Gottschalk, C., Grüsser, O.J., & Lindau, M. (1978). Tracking movements of the eyes elicited by auditory stimuli of a constant angular velocity. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 377, 46.
- Grimes, J. (1996). On the failure to detect changes in scenes across saccades. In K. Akins, *Perception: Vancouver Studies in Cognitive Sciences*, Vol. 2 (89-110). New York: Oxford University Press.

- Gur, R.C., & Hilgard, E.R. (1975). Visual imagery and the discrimination of differences between altered pictures simultaneously and successively presented. *British Journal of Psychology*, 66 (3), 341-345.
- Gutjahr, G. (1965). *Die Methode der Blickregistrierung*. Dissertation, Fakultät Sozialwissenschaften, Universität Göttingen.
- Haberich, F.J., & Fischer, M.H. (1958). Die Bedeutung des Lidschlags für das Sehen beim Umherblicken. *Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 267, 626-635.
- Haines, R.F. (1991). A breakdown in simultaneous information processing. In G. Obrecht & L. Stark, *Presbyopia Research, Plenum* (171-175). New York: Plenum.
- Hari, R., Salmelin, R., Tissari, S.O., Kajola, M., & Virsu, V. (1994). Visual stability during eyeblinks. *Nature*, 367, 121-122.
- Harp, C.J., & Rensink, R.A. (1999). A comparison of attentional processing in younger and older observers. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 40 (4), 270.
- Hayhoe, M. (2000). Visual routines: A functional account of vision. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 43-64.
- Heller, D. (1988). On the history of eye movement recording. In G. Luer, U. Lass & J. Shallo-Hoffmann, *Eye Movement Research, Physiological and Psychological Aspects*, Vol. 2 (36-50). Toronto: Hogrefe.
- Helmert, J., Dornhöfer, S.M., Joos, M., & Velichkovsky, B.M. (2003). Change blindness effects in virtual starfields. *Perception*, 32, 140.
- Helmholz, H. von (1866). *Handbuch der physiologischen Optik*. Hamburg: Voss.
- Henderson, J.M. (1997). Transsaccadic memory and integration during real-world object identification. *Psychological Science*, 8, 51-55.
- Henderson, J.M., & Hollingworth, A. (1999). The role of fixation position in detecting changes across saccades. *Psychological Science*, 10 (5): 438-443.
- Henderson, J.M., & Hollingworth, A. (2003). Eye movements and visual memory: Detecting changes to saccade targets in scenes. *Perception and Psychophysics*, 65(1), 58-71.

-
- Hochberg, J.E. (1968). "In the mind's eye." In R.N. Haber, *Contemporary Theory and Research in Visual Perception* (309–331). New York: Holt, Rinehart, & Winston.
- Hoffman, J.E. (1999). Stages of processing in visual search and attention. In B. Challis & B.M. Velichkovsky, *Stratification in Cognition and Consciousness* (43-72). Amsterdam: John Benjamins.
- Hoffman, J.E., & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception and Psychophysics*, 57, 787-795.
- Holland, M.K., & Tarlow, G. (1972). Blinking and mental load. *Psychological Reports*, 31, 119-127.
- Hollingworth, A., & Henderson, J.M. (1998). Does consistent scene context facilitate object perception? *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 398-415.
- Hollingworth, A., & Henderson, J.M. (1999). Object identification is isolated from scene semantic constraint: Evidence from object type and token discrimination. *Acta Psychologica*, 102, 319-343.
- Hollingworth, A., & Henderson, J.M. (2000). Semantic informativeness mediates the detection of changes in natural scenes. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 213-235.
- Hollingworth, A., & Henderson, J.M. (2003). Testing a conceptual locus for the inconsistent object change detection advantage in real-world scenes. *Memory & Cognition*, 31, 930-940.
- Hollingworth, A., Schrock, G., & Henderson, J.M. (2001). Change detection in the flicker paradigm: The role of fixation position within the scene. *Memory & Cognition*, 29, 296-304.
- Horowitz, T.S., & Wolfe, J.M. (1998). Visual search has no memory. *Nature*, 394 (6693), 575-577.
- Huey, E.B. (1898). Preliminary experiments in the psychology and physiology of reading. *American Journal of Psychology*, 9, 575–86.
- Humphreys, D.G., & Kramer, A.F. (1997). Age differences in visual search for feature, conjunction, and triple-conjunction targets. *Psychology and Aging*, 12 (4), 704-717.

- Intraub, H. (1980). Presentation rate and the representation of briefly glimpsed pictures in memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6 (1), 1–12.
- Irwin, D.E. (1991). Information integration across saccadic eye movements. *Cognitive Psychology*, 23, 420–456.
- Irwin, D.E. (1996). Integrating information across saccadic eye movements. *Current Directions in Psychological Science*, 5, 94–100.
- Issing, L.J., Mickasch, H.D., & Haak, J. (1986). *Blickbewegung und Bildverarbeitung*. Frankfurt a.M.: Peter Lang.
- Javal, E. (1905). *Physiologie de la lecture et de l'écriture*. Paris: Félix Alcan.
- Jeannerod, M., Gerin, P., & Pernier, J. (1968). Deplacements et fixations du regard dans l'exploration d'une scene visuelle. *Vision Research*, 8, 81-97.
- Joos, M., Rötting, M., & Velichkovsky, B.M. (2003). Die Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden, innovative Anwendungen. In W. Deutsch, T. Herrmann & G. Rickheit, *Handbuch der Psycholinguistik* (142-168). Berlin: De Gruyter.
- Joseph, J.S., Chun, M.M., & Nakayama, K. (1997). Attentional requirements in a 'preattentive' feature search task. *Nature*, 387, 805–807.
- Judd, C.H., McAllister, C.N., & Steel, W.M. (1905). General introduction to a series of studies of eye movements by means of kinoscopic photographs. In J.M. Baldwin, H.C. Warren & C.H. Judd, *Psychological Review, Monograph Supplements, Vol. 7* (1-16). Baltimore: The Review Publishing Company.
- Kahle, W. (1991). *Taschenatlas der Anatomie, Band 3: Nervensystem und Sinnesorgane*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Kahneman, D. (1968). Method, findings, and theory in studies of visual masking. *Psychological Bulletin*, 70, 404-425.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Kahneman, D., Treisman, A., & Gibbs, B. (1992). The reviewing of object files: Object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, 24, 175–219.

-
- Kanwisher, N.G. (1987). Repetition blindness: Type recognition without token individuation. *Cognition*, 27, 117-143.
- Karsh, R., & Breitenbach, F.W. (1983). Looking at looking: The amorphous fixation measure. In R. Groner, C. Menz, D.F. Fisher & R.A. Monty, *Eye Movements and Psychological Functions: International Views* (53-64). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Keane, S., Hayward, W.G., & Burke, D. (2003). Detection of three types of changes to novel objects. *Visual Cognition*, 10 (1), 101–127.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision Research*, 35 (13), 1897-1916.
- Kuleshov, L. (Russisches Original 1920, Englische Übersetzung 1974). *Kuleshov on Film*, Übersetzung: R. Levaco. Berkeley: University of California Press.
- Lamansky, S. (1869). Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit der Blickbewegung respektive Augenbewegung. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, 2, 418-422.
- Lancaster, W.B. (1941). Fifty years experience in ocular motility. *American Journal of Ophthalmology*, 24, 299-300.
- Land, M.F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B - Biological Sciences*, 352, 1231-1239.
- Land, M.F., & McLeod, P. (2000). The eye movement strategies of batsmen in cricket. *Investigate Ophthalmology & Visual Science*, 40, 815.
- Leigh, R.J., & Zee, D.S. (1980). Eye Movements of the blind. *Investigative Ophthalmology*, 19, 328 – 331.
- Levin, D.T., & Simons, D.J. (1997). Failure to detect changes to attended objects in motion pictures. *Psychonomic Bulletin and Review*, 4 (4), 501–506.
- Levin, D.T., & Simons, D.J. (2000). Perceiving Stability in a changing world: Combining shots and integrative views in motion pictures and the real world. *Mediapsychology*, 2, 357-380.

-
- Levin, D.T., Simons, D.J., Angelone, B.L., & Chabris, C.F. (2002). Memory for centrally attended changing objects in an incidental real-world change detection paradigm. *British Journal of Psychology*, 93, 289-302.
- Liu, A., & Pentland, A. (1997). Recognizing driver intentions with hidden markov models. *Nissan Technical Review*, 41, 53-56.
- Loftus, E.F. (1979). *Eyewitness Testimony*. Cambridge: Harvard University Press.
- Loftus, E.F., & Ketcham, K. (1991). *Witness for the Defense: The Accused, the Eyewitness, and the Expert Who Puts Memory on Trial*. New York: St. Martin's Press.
- Loftus, E.F., & Palmer, J. (1974). Reconstruction of automobile destruction: An example of the interaction between language and memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 13, 585-589.
- Lord, M.P., & Wright, W.D. (1948). Eye movements during monocular fixation, *Nature*, 162, 25-26.
- Luck, S.J., & Vogel, E.K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390, 279-280.
- Mack, A., & Rock, I. (1998). *Inattentional Blindness*. Cambridge: MIT Press.
- Mackworth, J.F., & Mackworth, N.H. (1958). Eye fixations recorded on changing visual scenes by the Television eye-marker. *Journal of the Optical Society of America*, 48, 439-445.
- Mackworth, N.H. (1965). Visual noise causes tunnel vision. *Psychonomic Science*, 3, 67-68.
- Matin, E. (1974). Saccadic suppression: A review and analysis. *Psychological Bulletin*, 81, 899-917.
- McConkie, G.W., & Currie, C. (1996). Visual stability across saccades while viewing complex pictures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22 (3), 563-581.
- McConkie, G.W., & Rayner, K. (1976). Identifying the span of the effective stimulus in reading: Literature review and theories of reading. In H. Singer & R.B. Ruddell,

-
- Theoretical Models and Processes of Reading*, 2nd ed. (137–162). Newark: International Reading Association,.
- McConkie, G.W., & Zola, D. (1979). Is visual information integrated across successive fixations in reading. *Perception & Psychophysics*, 25 (3), 221-224.
- McLin, L., & Schor, C.M. (1988). Voluntary effort as a stimulus to accommodation and vergence. *Investigate Ophthalmology & Visual Science*, 29, 1739-1746.
- Menozzi, M., & Krueger, H. (1997). Mikrofluktuationen der Akkommodation. *Klinische Monatsblätter Augenheilkunde*, 210, 325-326.
- Merrison, A.F.A., & Carpenter, R.H.S. (1995). 'Express' smooth pursuit. *Vision Research*, 35, 1459-1462.
- Messaris, P. (1994). *Visual Literacy: Images, Mind, and Reality*. Boulder: Westview Press.
- Meyers, I.L. (1929). Electronystagmography. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 21, 901-918.
- Miranda, N., Jackson, L.S., Bentley, D.M., Gash, G.H., & Nallan, G.B. (1992). Children discover addition more easily and faster than deletions. *Psychological Record*, 42, 117-129.
- Mondy, S., & Coltheart, V. (2000). Detection and identification of change in naturalistic scenes. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 281-296.
- Morimoto, C.H., Koons, D., Amir, A., & Flickner, M. (2000). Pupil Detection and tracking using multiple light sources. *Image and Vision Computing*, 8, 331-335.
- Mourant, R.R., & Rockwell, T.H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors*, 14, 325-335.
- Murch, W. (2001). *In the Blink of an Eye* (Revised 2nd Edition). Los Angeles: Silman-James Press.
- Nagayama, Y. (1978). Role of visual perception in driving. *IATSS Research*, 2, 64-73.
- Nallan, G.B., Bentley, D.M., Carr, J.F., Lyons, K., Moore, D.S., & Underhill, T. (1994). Adult humans perform better on addition than deletion problems. *Psychological Record*, 44, 489-499.

-
- Neisser, U. (1967). *Cognitive Psychology*. Englewoods Cliffs: Prentice-Hall.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and Reality*. San Francisco: W.H. Freeman and Company.
- Neisser, U. (1979). The control of information pickup in selective looking. In: A.D. Pick, *Perception and its Development: A Tribute to Eleanor J. Gibson* (201–219). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Nickerson, R.S., & Adams, M.J. (1979). Long-term memory for a common object. *Cognitive Psychology*, 1, 287–307.
- Norton, D., & Stark, L. (1971). Scanpaths in saccadic eyemovements during pattern perception, *Science*, 1971, 308-311.
- Olek, K., Hentschel, M., Moritz, K., Wlodarczyk, W., Bienek, K.H.P., & Schultz, E. (2003). *Medicine Worldwide*. <http://www.m-ww.de/enzyklopaedie/anatomie_atlas> (Stand: 12.06.2003, Abfrage am 04.08.2003).
- Oliva, A., & Schyns, P. (1997). Coarse blobs or fine edges? Evidence that information diagnosticity changes the perception of complex visual stimuli. *Cognitive Psychology*, 34, 72–107.
- O'Regan, J.K. (1981). The convenient viewing position hypothesis. In D.F. Fisher, R.A. Monty & J.W. Senders, *Eye Movements: Cognition and Visual Perception* (289-298). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- O'Regan, J.K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24 (5), 939-973.
- O'Regan, J.K., Rensink, R.A., & Clark, J.J. (1999). Change-blindness as a result of "mudsplashes". *Nature*, 398 (6722), 34.
- O'Regan, J.K., Deubel, H., Clark, J.J., & Rensink, R.A. (2000). Picture changes during blinks: Looking without seeing and seeing without looking. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 191-211.
- Palmer, S.E. (1999). *Vision Science: Photons to Phenomenology*. Cambridge: MIT Press.
- Pannasch, S., Dornhöfer, S.M., Unema, P.J.A., & Velichkovsky, B.M. (2001a). The omnipresent prolongation of visual fixations: saccades are inhibited by changes in situation and in subject's activity. *Vision Research*, 41 (25-26), 3345-3351.

-
- Pannasch, S., Dornhöfer, S.M., Unema, P.J.A., Zapf, S., & Velichkovsky, B.M. (2001b). *Separating Ambient and Focal Fixations: A Step in the Evolution of Eye-Movement-Based Filtering*. Poster Präsentation bei der 11. European Conference on Eye Movements, Turku, 22.-25. August.
- Pashler, H. (1988). Familiarity and visual change detection. *Perception and Psychophysics*, 44 (4), 369-378.
- Phillips, W.A., & Singer, W. (1974). Function and interaction of on and off transients in vision I: Psychophysics. *Experimental Brain Research*, 19, 493-506.
- Pillalamari, R.S., Barnette, B.D., & Birkmire, D. (1993). Cluster: A program for the identification of eye-fixation-cluster characteristics. *Behavioral Research Methods, Instruments and Computers*, 25, 9.
- Pomplun, M., Velichkovsky, B.M., & Ritter, H. (1996). Disambiguating complex visual information: Towards communication of personal views of a scene. *Perception*, 25 (8), 931-948.
- Pomplun, M., Reingold, E.M., & Shen, J. (2001). Investigating the visual span in comparative search: The effects of task difficulty and divided attention. *Cognition*, 81, 57-67.
- Ponder, E., & Kennedy, W.P. (1927). On the act of blinking. *Quarterly Journal of Physiology*, 18, 89-110.
- Posner, M.I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-23.
- Posner, M.I. (1995). Attention in cognitive neuroscience. In M.S. Gazzaniga, *The Cognitive Neurosciences* (615-624). Cambridge: MIT Press.
- Posner, M.I., Snyder, C.R.R., & Davidson, B.J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109, 160-174.
- Pringle, H.L., Irwin, D.E., Kramer, A.F., & Atchley, P. (2001). The role of attentional breadth in perceptual change detection. *Psychonomic Bulletin and Review*, 8, 89-95.
- Pylyshyn, Z.W., & Storm, R.W. (1988). Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism. *Spatial Vision*, 3, 179-197.

-
- Ramon y Cajal, S. (Französisches Original, 1909; Englische Übersetzung, 1995). *Histology of the Nervous System*, Vol. 2, Übersetzung: N. Swanson & L.W. Swanson. Oxford: Oxford University Press.
- Raymond, J.E., Shapiro, K.L., & Arnell, K.M. (1992). Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: An attentional blink? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 849-860.
- Rayner, K. (1975). The perceptual span and peripheral cues in reading. *Cognitive Psychology*, 7, 65-81.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124, 372-422.
- Rayner, K., & Fisher, D.L. (1987). Eye movements and the perceptual span during visual search. In J.K. O'Regan & A. Levy-Schoen, *Eye Movements: From Physiology to Cognition* (293-302). Amsterdam: Elsevier.
- Rayner, K., & Pollatsek, A. (1989). *The Psychology of Reading*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Reeves, A., & Sperling, G. (1986). Attention gating in short-term visual memory. *Psychological Review*, 93, 180-206.
- Reingold, E.M., Charness, N., Pomplun, M., & Stampe, D.M. (2001). Visual span in expert chess players: Evidence from eye movements. *Psychological Science*, 12 (1), 48-55.
- Reitter, C. (2000). *Beanspruchung des Autofahrers durch Monotonie*. Dissertation, Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme, Universität Berlin.
- Rensink, R.A. (1997). How much of a scene is seen? The role of attention in scene perception. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 38, S707.
- Rensink, R.A. (1998). Mindsight: Visual sensing without seeing. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 39, 631.
- Rensink, R.A. (2000a). Visual search for change: A probe into the nature of attentional processing. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 345-376.

- Rensink, R.A. (2000b). The dynamic representation of scenes. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 17-42.
- Rensink, R.A. (2002). Change detection. *Annual Reviews Psychology*, 53, 245-277.
- Rensink, R.A. (2004). Visual sensing without seeing. *Psychological Science*, 15, 27-32.
- Rensink, R.A., O'Regan, J.K., & Clark, J.J. (1997). To see or not to see: The need for attention to perceive changes in scenes. *Psychological Science*, 8, 368-373.
- Rensink, R.A., O'Regan, J.K., & Clark, J.J. (2000). On the failure to detect changes in scenes across brief interruptions. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 127-145.
- Rich, A., & Gillam, B. (2000). Failure to detect changes in color for lines rotating in depth: The effects of grouping and type of color change. *Vision Research*, 40, 1469-1487.
- Richard, C.M., Wright, R.D., Prime, S.L., Ee, C., Shimizu, Y., & Vavrik, J. (2002). The effect of a concurrent auditory task on visual search performance in a driving-related image-flicker task. *Human Factors*, 44(1), 108-119.
- Robinson, D.A. (1963). A method for measuring eye movements using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 10, 137-145.
- Robinson, D.A. (1964). The mechanics of human saccadic eye movements. *Journal of Physiology*, 174, 245-264.
- Rock, I. (1975). The perception of disoriented figures, *Scientific American*, 230, 78-85.
- Rodiek, R.W. (1998). *The First Steps in Seeing*. Sunderland: Sinauer Associates.
- Rogers, W.A., & Fisk, A.D. (1991). Are age differences in consistent-mapping visual search due to feature learning or attention training? *Psychology and Aging*, 6, 542-550.
- Rosch, E., Mervis, C., Gray, W., Johnson, D., & Boyes-Braem, P. (1976). Basic objects in natural categories. *Cognitive Psychology*, 8, 382-439.
- Rößger, P. (1997). Die Entwicklung der Pupillometrie zu einer Methode der Messung mentaler Beanspruchung in der Arbeitswissenschaft. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.

- Rutkowski, J., Crewther, D.P., & Crewther, S.G. (2003). Change detection is impaired in children with dyslexia: Implications for the dorsal visual pathway. *Journal of Vision*, 1 (10), 95-105.
- Ryan, J.D., Althoff, R.R, Whitlow, S., & Cohen, N.J. (2000). Amnesia is a deficit in relational memory. *Psychological Science*, 11, 454-461.
- Saiki, J. (2002). Multiple-object permanence tracking: Limitation in maintenance and transformation of perceptual objects. In J. Hyönä, D. Munoz, W. Heide & R. Radach, *The Brain's Eyes: Neurobiological and Clinical Aspects of Oculomotor Research, Progress in Brain Research* (133-148). Oxford: Elsevier.
- Saiki, J. (2003). Feature binding in object-file representations of multiple moving items. *Journal of Vision*, 1(2), 6-21.
- Salvucci, D.D. (2001). Predicting the effects of in-car interface use on driver performance: An integrated model approach. *International Journal of Human-Computer Studies*, 55, 85-107.
- Salvucci, D.D., & Liu, A. (2002). The time course of a lane change: Driver control and eye movement behavior. *Transportation Research, Part F*, 5 (2), 123-132.
- Salvucci, D.D., Boer, E.R., & Liu, A. (2001). Toward an integrated model of driver behavior in a cognitive architecture. *Transportation Research Record*, 1779, 9-16.
- Sanocki, T., & Epstein, W. (1997). Priming spatial layout of scenes. *Psychological Science*, 8, 374-378.
- Saslow, M.G. (1967). Effects of components of displacement-step stimuli upon latency of saccadic eye movement. *Journal of the Optical Society of America*, 57, 1024-1029.
- Schiller, P.H., True, S.D., & Conway, J.L. (1980). Deficits in eye movements following frontal eye field and superior colliculus ablations. *Journal of Neurophysiology*, 44, 1175-1189.
- Schott, E. (1922). Über die Registrierung des Nystagmus und anderer Augenbewegungen vermittels des Saitengalvanometers. *Deutsches Archiv für klinische Medizin*, 40, 79-90.
- Scott-Brown, K.C., & Orbach, H.S. (1998). Contrast discrimination, non-uniform patterns and change blindness. *Proceedings of the Royal Society, B* (265), 159-2166.

-
- Scott-Brown, K.C., Baker, M.R., & Orbach, H.S. (2000). Comparison blindness. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 254-267.
- Shinoda, H., Hayhoe, M.M., & Shrivastava, A. (2001). What controls attention in natural environments? *Vision Research*, 41 (25-26), 3535 - 3545.
- Shore, D.I., & Klein, R.M. (2000). The effects of scene inversion on change blindness. *Journal of General Psychology*, 127 (1), 27-43.
- Simons, D.J. (1996). In sight, out of mind: When object representations fail. *Psychological Science*, 7 (5), 301-305.
- Simons, D.J. (2000). Current approaches to change blindness. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 1-16.
- Simons, D.J., & Levin, D.T. (1998). Failure to detect changes to people in a real-world interaction. *Psychonomic Bulletin and Review*, 5 (4), 644-649.
- Simons, D.J., Franconeri, S.L., & Reimer, R.L. (2000). Change blindness in the absence of visual disruption. *Perception*, 29, 1143-1154.
- Simons, D.J., Chabris, C.F., & Schnur, T. (2002). Evidence for preserved representations in change blindness. *Consciousness and Cognition*, 11, 78-97.
- Simons, D.J., Chabris, C.F., Schnur, T., & Levin, D.T. (eingereicht). Change blindness is not caused by later events overwriting earlier ones in visual short-term memory.
- Smilek, D., Eastwood, J.D., & Merikle, P.M. (2000). Does unattended information facilitate change detection? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26 (2), 480-487.
- Sokolov, E.N. (1963). *Perception and Conditioned Reflex*. London: Pergamon Press.
- Stampe, D.M., & Reingold, E.M. (2002). *SR Research EyeLink*. URL: <<http://www.eyelinkinfo.com>> (Stand: 16.08.2002, Abfrage am 23.12.2002).
- Stelmach, L.B., Bourassa, C.M., & Di Lollo, V. (1984). Detection of stimulus change: The hypothetical roles of visual transient responses. *Perception & Psychophysics*, 35 (3), 245-255.
- Stern, J.A., Walrath, L.C., & Goldstein, R. (1984). The endogenous eyeblink. *Psychophysiology*, 21, 22-33.

-
- Stern, J.A., Boyer, D., & Schroeder, D. (1994). Blink rate: A possible measure of fatigue. *Human Factors*, 36, 285-297.
- Stroud, J.M. (1955). The fine structure of psychological time. In H. Quastler, *Information Theory in Psychology: Problems and Methods* (174–207). Glencoe: Free Press.
- Tanenbaum, A.S. (1976). *Structured Computer Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Tarr, M.J., & Gauthier, I. (2000). FFA: A flexible fusiform area for subordinate-level visual processing automatized by expertise. *Nature Neuroscience*, 3 (8), 764-769.
- Tatler, B.W. (2001). Characterising the visual buffer: real-world evidence for overwriting early in each fixation. *Perception*, 30, 993-1006.
- Thornton, I.M., & Fernandez-Duque, D. (2002). Converging evidence for the detection of change without awareness. In J. Hyönä, D. Munoz, W. Heide & R. Radach, *The Brain's Eyes: Neurobiological and Clinical Aspects of Oculomotor Research, Progress in Brain Research* (99-118). Oxford: Elsevier.
- Tietze, H., & Hargutt, V. (2001). *Zweidimensionale Analyse zur Beurteilung des Verlaufs von Ermüdung*. Poster Präsentation bei der 43. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Regensburg, 09.-11. April.
- Treisman, A.M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.
- Trevarthen, C.B. (1968). Two mechanisms of vision in primates. *Psychologische Forschung*, 31, 299-337.
- Triesch, J., Ballard, D.H, Hayhoe, M.M., & Sullivan, B.T. (2003). What you see is what you need. *Journal of Vision*, 1 (9), 86-94.
- Turatto, M., Bettella, G., Umiltà, C., & Bridgeman, B. (2003). Perceptual conditions necessary to induce change blindness. *Visual Cognition*, 10, 233-255.
- Unema, P.J.A. (1995). *Eye Movements and Mental Effort*. Aachen: Verlag Shaker.
- Unema, P.J.A., Dornhöfer, S.M., Steudel, S., & Velichkovsky, B.M. (im Druck). An attentive look at driver's fixation durations. In A.G. Gale, I.D. Brown, C.M. Haslegrave & S.P. Taylor, *Vision in Vehicles VIII*. Amsterdam: Elsevier.

-
- Ungerleider, L.G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D.J. Ingle, M.A. Goodale & R.J.W. Mansfield, *Analysis of Visual Behavior* (549-586). Cambridge: MIT Press.
- Velichkovsky, B.M. (1982). Visual cognition and its spatial-temporal context. In F. Klix, J. Hoffmann & E. van der Meer, *Cognitive research in psychology* (63-79). Amsterdam: North Holland.
- Velichkovsky, B.M. (1990). The vertical dimension of mental functioning. *Psychological Research*, 52, 282-289.
- Velichkovsky, B.M. (1994). The levels endeavour in psychology and cognitive science. In P. Bertelson, P. Eelen, & G. d'Ydewalle, *International Perspectives in Psychological Sciences: Leading Themes* (143-158). Howe: Lawrence Erlbaum Associates.
- Velichkovsky, B.M. (1999). From levels of processing to stratification of cognition: Converging evidence from three domains of research. In B.H. Challis & B.M. Velichkovsky, *Stratification in Cognition and Consciousness* (203-235). Amsterdam: John Benjamins.
- Velichkovsky, B.M. (2001). Levels of processing: Validating the concept. In M. Naveh-Benjamin, M. Moscovitch & H.L. Roediger III, *Perspectives on Human Memory and Cognitive Aging: Essays in Honour of Fergus I.M. Craik*. Philadelphia: Psychology Press.
- Velichkovsky, B.M. (2002). Heterarchy of cognition: The depths and the highs of a framework for memory research. *Memory*, 10 (5/6), 405-419.
- Velichkovsky, B.M., Pomplun, M., & Rieser, H. (1996). Attention and communication: Eye-movement-based research paradigms. In W.H. Zangemeister, H.S. Stiehl & C. Freksa, *Visual Attention and Cognition* (125-154). Amsterdam: Elsevier.
- Velichkovsky, B.M., Sprenger, A., & Unema, P.J.A. (1997). Towards gaze mediated interaction: collecting solutions of the "midas touch" problem. In S. Howard, J. Hammond & G. Lindgaard, *Human-Computer Interaction: INTERACT'97* (509-516). London: Chapman and Hall.

-
- Velichkovsky, B.M., Rothert, A., Kopf, M., Dornhöfer, S.M., & Joos, M. (2002). Towards an express diagnostics for level of processing and hazard perception. *Transportation Research, Part F*, 5 (2), 145-156.
- Verheijen, F.J. (1961). A simple after-image method demonstrating the involuntary multi-directional eye movements during fixation. *Optica Acta*, 6, 309-311.
- Wallach, H., & Lewis, C. (1966). The effect of abnormal displacement on the retinal image during eye movements. *Perception & Psychophysics*, 1, 25–29.
- Wallis, G., & Bühlhoff, H.H. (2000). What's in scene and not seen. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 175-190.
- Wang, R.F., & Simons, D.J. (1998). Perceiving real-world viewpoint changes. *Psychological Science*, 9 (4), 315– 320.
- Weiskrantz, L. (1996). Blindsight revisited. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 215-220.
- Werner, S., & Thies, B. (2000). Is "change blindness" attenuated by domain-specific expertise? An expert-novices comparison of change detection in football images. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 163-173.
- Wertheimer, M. (1912). Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie*, 61, 161-265.
- Wilken, P., Mattingley, J.B., Webster, W.R., & Conway, D. (1999). Capacity limits for conjunctions of colour in visual short-term memory. *Australian Journal of Psychology*, 51, 47.
- Williams, P., & Simons, D.J. (2000). Detecting changes in novel 3D objects: Effects of change magnitude, spatiotemporal continuity, and stimulus familiarity. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 297-322.
- Wolfe, J.M. (1996). Post-attentive vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 37, S214.
- Wolfe, J.M. (1999a). Visual experience: Less than you think, more than you know. In C. Taddei-Ferretti & C. Musio, *Neuronal Basis and Psychological Aspects of Consciousness*, Vol. 8 (165-185). Singapore: World Scientific.

-
- Wolfe, J.M. (1999b). Inattentional amnesia. In V. Coltheart, *Fleeting Memories* (71-94). Cambridge: MIT Press.
- Wright, M.J., Green, A., & Baker, S. (2000). Limitations for change detection in multiple gabor targets. *Visual Cognition*, 7 (1-3), 237-252.
- Wundt, W. (1862). *Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung*. Leipzig, Heidelberg: C.F. Winter
- Yarbus, A.L. (1967). *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum Press.
- Yokosawa, K., & Mitsumatsu, H. (2003). Does disruption of a scene impair change detection? *Journal of Vision*, 1 (5), 95-105.
- Young, L.R., & Sheena, D. (1975). Survey of eye movement recording methods. *Behavioral Research Methods & Instrumentation*, 7 (5), 397-429.
- Zelinsky, G. (2001). Eye movements during change detection: Implications for search constraints, memory limitations, and scanning strategies. *Perception and Psychophysics*, 63, 209-225.

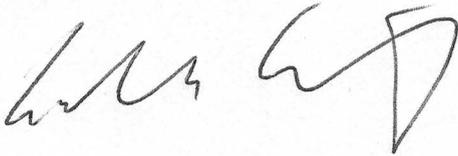
Erklärung

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Arbeits-, Organisations- und Sozialpsychologie, an der Professur für Ingenieurpsychologie und Kognitive Ergonomie der Technischen Universität Dresden unter der wissenschaftlichen Betreuung von Prof. Dr. phil. habil. Boris M. Velichkovsky angefertigt.

Ich versichere, dass ich die Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass sie bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Promotionsordnung der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften vom 20. März 2000 erkenne ich an.

Dresden, den 18.08.2004

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes. The signature is written in a cursive style and is positioned above the printed name.

Sascha M. Dornhöfer