

Visuelle Kontrolle der Lokomotion

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Naturwissenschaftlichen Fachbereiche

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Astros Chatziastros

aus Reutlingen

Tübingen, 2003

Dekan: Prof. Dr. Joachim Stiensmeier-Pelster

1. Berichterstatter: Prof. Karl Gegenfurtner, Ph.D.

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Heinrich Bülhoff

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Mai 2003

Αφιερωμένο στη γιαγιά Χαρίκλεια

Für meine Großmutter Chariklia

KURZZUSAMMENFASSUNG

Das visuelle Wahrnehmungssystem ermöglicht es dem Menschen Objekte in seiner Umwelt zu erkennen, zu lokalisieren, anzusteuern oder zu vermeiden. Das visuelle Wahrnehmungssystem liefert dem Menschen die dazu notwendigen Informationen über seine gegenwärtige Lage in Relation zur Umwelt und wie diese sich in nächster Zeit aller Voraussicht nach verändern wird. Doch um welche Informationen, Angaben oder Nachrichten handelt es sich dabei? Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Frage - der Frage nach den Quellen visueller Information zur Kontrolle der Fortbewegung.

Das Augenmerk richtet sich in dieser Arbeit dabei besonders auf dynamische Information. Einen Teil dieser dynamischen Information erzeugt ein Beobachter durch seine eigene Fortbewegung. Bewegung und Bewegungsrichtung sowie Geschwindigkeit und Geschwindigkeitstrukturen charakterisieren dabei die Umwelt, und über diese visuelle Informationen kann ein Beobachter seine Position und Orientierung in der Umwelt abschätzen, aber auch einen Eindruck über die Beschaffenheit der Umwelt bekommen.

In der Einleitung wird dazu der Begriff der Bewegungsparallaxe und das Konzept des optischen Flusses erklärt. Es wird aufgezeigt, welche empirische Evidenz für die Wahrnehmung des optischen Flusses vorliegt, welche physiologischen Mechanismen für die Registrierung des optischen Flusses identifiziert worden sind und welche Kontrollstrategien vorgeschlagen wurden. Es wird auch gezeigt, dass nicht geklärt ist, ob Menschen optischen Fluss für die Kontrolle der Lokomotion tatsächlich nutzen, sondern Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Debatten ist, und dass vor allem bei einer Bewegung mit einem Fahrzeug weitere potente Informationsquellen vorliegen, allem voraus Lageinformationen über Seitenlinien und Fahrbahnbegrenzungen. Der experimentelle Teil dieser Arbeit setzt dann an der Frage an, ob für die Fahrzeugführung tatsächlich einzig die Orientierung an Seitenlinien ausreicht oder ob auch weitere visuelle Größen, wie die Geschwindigkeit der Umgebung und die Struktur des optischen Flusses, eine Bedeutung für die Kontrolle beim Fahren haben.

In allen hier dargestellten experimentellen Arbeiten wurde die spezielle Technik der *virtuellen Realität* verwendet, in der die Probanden interaktiv innerhalb einer computergenerierten visuellen Szene agierten. In allen experimentellen Arbeiten wurde den Probanden die Aufgabe gestellt, Fahrten in einer virtuellen Umgebung zu absolvieren. Die ersten Experimente unter-

suchten die Hypothese, dass die Position in einem Korridor durch die Winkelgeschwindigkeit der Umgebung im visuellen Feld reguliert wird (Kapitel 2). Da die Winkelgeschwindigkeit der Umgebung während der Vorwärtsbewegung von der Entfernung zum Beobachter abhängt, kann sie somit prinzipiell eine Informationsquelle darstellen, über die ein Fahrer seinen Abstand kontrollieren könnte. Zur Untersuchung dieser Hypothese wurde in diesen Experimenten die Winkelgeschwindigkeit der Umgebung gezielt verändert. Die Ergebnisse bestätigen die Hypothese, da sie systematische Positionsänderungen in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit der Umgebung aufzeigen, und sie erweitern frühere Befunde zur Flugkontrolle von Bienen (Srinivasan et al., 1991). Es wurde aber auch festgestellt, dass die Fahrer sich gleichzeitig an der räumlichen Struktur (Ortsfrequenzen) der Umgebung und an Seitenlinien orientieren. Die verschiedenen Informationsquellen werden dabei unterschiedlich gewichtet, und ihre Gewichtung kann sich mit der Höhe der gefahrenen Geschwindigkeit ändern.

Nachdem festgestellt wurde, dass die Geschwindigkeit im optischen Flussfeld eine verwendete Informationsquelle ist, wird auf spezielle Probleme der Geschwindigkeitswahrnehmung eingegangen (Kapitel 3). Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Frage, ob die Geschwindigkeitswahrnehmung auch von der räumlichen Struktur der Umgebung abhängt. Dazu wurden zwei psychophysische Experimente als klassische Diskriminationsaufgaben durchgeführt. Es wurde sowohl (a) die Unterscheidungsfähigkeit für unterschiedliche Geschwindigkeiten (Geschwindigkeitsdiskrimination), wie auch (b) die wahrgenommene Geschwindigkeit in Abhängigkeit von unterschiedlich breiten Mustern bestimmt. Es stellte sich heraus, dass die Diskriminationsleistungen nicht von der räumlichen Struktur der Umgebung abhängen, wohl aber die wahrgenommene Geschwindigkeit. Es konnte des Weiteren gezeigt werden, dass über die individuellen Diskriminationsleistungen der Probanden die Fahrleistungen beim aktiven Befahren des Korridors teilweise vorhergesagt werden können.

In Kapitel 4 wird untersucht, ob Fahrer ihre Bewegungsrichtung über die Struktur des optischen Flusses bestimmen. Dazu wurde eine spezifische Vorhersage eines Modells zur Bestimmung der Bewegungsrichtung über optischen Fluss (*spatial pooling hypothesis*) überprüft (Warren & Saunders, 1995). Nach diesem Modell wird zur Bestimmung der Bewegungsrichtung Information über das gesamte visuelle Feld integriert. Diese weiträumige Integration sollte dann bei bewegten Objekten im visuellen Feld dazu führen, dass die geschätzte Bewegungsrichtung systematisch beeinflusst wird, was wiederum zu kompensatorischen Lenkreaktionen führen sollte. Die störende Objektbewegung wurde in diesen Experimenten als Schneesturm und als

seitliche, großflächige Bewegung eines Vogelschwarms präsentiert. Systematische, kompensatorische Lenkreaktionen konnten zwar beobachtet werden, die Richtung der erzielten Effekte sind jedoch im Widerspruch zur Vorhersage des getesteten Modells, so dass es insgesamt nicht bestätigt werden kann.

Die möglichen Gründe für die beobachteten Lenkreaktionen bei einer großflächigen visuellen Bewegung werden in den folgenden zwei Abschnitten genauer untersucht (Kapitel 5 und Kapitel 6). In Kapitel 5 werden zwei Hypothesen getestet. Die erste Hypothese unterstellt, dass Fahrer ihre Bewegungsrichtung in Bezug zur Straße falsch einschätzen, da die großflächige visuelle Bewegung eine optische Illusion provoziert. Die zweite Hypothese geht davon aus, dass durch eine großflächige visuelle Bewegung diejenige Richtung, die ein Beobachter subjektiv als geradeaus empfindet, verändert werden kann, so dass in der Folge die Lage der Straße relativ zum Beobachter als verschoben erscheint. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass eine falsch eingeschätzte Bewegungsrichtung aufgrund einer optischen Illusion die zutreffendere Erklärung ist. Die optische Illusion weist dabei Parallelen zum bekannten Phänomen der induzierten Bewegung auf und kann mit einem Modell erklärt werden, bei dem das visuelle System zur Bestimmung der Bewegungsrichtung in der Umwelt die Bewegungen auf der Netzhaut in kleinen, lokalen Bereichen kontrastiert (*Modell der Vektorsubtraktion*).

In einem weiteren Experiment wird festgestellt, dass systematische Beziehungen zwischen den Augen- und Kopfbewegungen der Fahrer und ihrer Fahrtrichtung existieren. Systematische Augen- und Kopfbewegungen können auch durch seitliche, visuell großflächige Bewegung ausgelöst werden und in der Folge zu systematischen Fahrtrichtungsänderungen führen (Kapitel 6). Dieser Befund kann als eine der ersten experimentellen Evidenzen angesehen werden für die These, dass die Menschen oft unwillkürlich dorthin fahren, wohin sie schauen.

Im letzten experimentellen Teil (Kapitel 7) wird ein Szenario untersucht, in dem die Aufmerksamkeit der Fahrer durch andere Fahrzeuge beeinflusst wird. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Fahrer systematisch auf die Präsenz anderer Fahrzeuge reagieren, wobei die Richtung der Positionsänderung davon abhängt, ob das Vorbeifahreignis mit dem anderen Fahrzeug bereits stattgefunden hat oder noch bevorsteht. Die Resultate lassen sich mit Hilfe zweier gegensätzlicher Tendenzen erklären, nach denen die Reaktionen der Fahrer das Resultat einer Blick-Fahrtrichtungs-Kopplung und einer Risiko-Minimierungs-Tendenz sind.

In der Summe zeigen diese Experimente, dass sich Fahrer zur Kontrolle der Fahrzeugführung nicht nur an Seitenlinien orientieren, sondern opti-

schen Fluss, Geschwindigkeitsinformation sowie räumliche Strukturen der Umwelt einbeziehen und Augenbewegungen koordiniert zur Erfüllung der Fahraufgabe einsetzen.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzzusammenfassung	i
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
Optischer Fluss	4
Beziehung Bewegungsparallaxe zu optischen Fluss	4
Struktur des optischen Flusses	5
Physiologische Verarbeitung von Bewegung und optischen Fluss	8
Aufgaben bei denen optischer Fluss eine Rolle spielt	10
Headingschätzung	11
Weitere Kontrollstrategien	15
Zielsetzung und Aufbau dieser Arbeit	18
2 Bientunnel	21
Kontrolle der Bewegung durch Geschwindigkeitsinformation	21
Bientunnel - erstes Experiment	25
Methoden	26
Ergebnisse	31
Zusammenfassung und Diskussion	44
Bientunnel - niedrige Geschwindigkeiten und Sinusmuster	55
Methoden	60
Ergebnisse	61
Zusammenfassung und Diskussion	65
Gesamtdiskussion und offene Fragen	69
3 Geschwindigkeitswahrnehmung und Struktur des Stimulus	73
Geschwindigkeitswahrnehmung	73
Geschwindigkeitsdiskrimination: Bestimmung der Schwellen	83
Methoden	84
Ergebnisse	86
Zusammenfassung und Diskussion	90
Subjektive Gleichheit bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen	92
Methoden	92
Ergebnisse	94
Zusammenfassung und Diskussion	97
Diskussion beider Experimente	99

4	Fahrfehler unter falschem Fluss.....	105
	Schneesturm	105
	Methoden.....	110
	Ergebnisse	113
	Diskussion	116
	Vogelschwarm	120
	Methoden.....	121
	Ergebnisse	122
	Zusammenfassung und Diskussion.....	125
5	Heading oder subjektives Geradeaus.....	127
	Expansionsfokus und Heading unter Schneefeldbewegung	128
	Methoden.....	131
	Ergebnisse	134
	Zusammenfassung und Diskussion.....	136
	ASA - subjektives Geradeaus	141
	Methoden.....	145
	Ergebnis ASA wird verändert	146
	Zusammenfassung und Diskussion.....	148
	Diskussion beider Experimente	148
6	Blick und Bewegungsrichtung.....	153
	Okulomotorische Determinanten des Fahrfehlers	153
	Methoden.....	157
	Ergebnisse	159
	Zusammenfassung und Diskussion.....	163
7	Strassenobjekte und Steuerverhalten.....	173
	Einleitung.....	173
	Methoden.....	178
	Ergebnisse	181
	Diskussion	185
8	Schlussbemerkung.....	193
	Anhang 1 - Simulationsaufbau	197
	Projektion	197
	Hardware und Software	198
	Eingabegeräte	198

Anhang 2 - Nachträge zum Bientunnelexperiment	200
Winkelgeschwindigkeiten ohne laterale Bewegung im Korridor	200
Punkt des Geschwindigkeitsabgleichs	201
Winkelgeschwindigkeiten mit lateraler Bewegung im Korridor	203
Anhang 3 - Blickrichtungsmessung	205
Eyetracker	205
Kalibrierung	206
Headtracker	206
Offline Berechnungen	208
Literatur	211
Danksagung	227
Lebenslauf	229

EINLEITUNG

Das visuelle System hat ein Riesenproblem. Die Welt, in der wir wohnen, hat drei Dimensionen. Das Bild auf unserer Retina hat eine weniger. Wie man trotz der Zweidimensionalität der Netzhaut eine dreidimensionale Umwelt wahrnimmt und in ihr zurechtkommt, ist eines der ältesten Probleme der Philosophie und der experimentellen Psychologie. Viele Fragen, die zur visuellen Wahrnehmung gestellt wurden, kommen mit dem Problem der Tiefenwahrnehmung in der einen oder anderen Weise in Berührung.

Wir haben im Laufe unseres Lebens gelernt, wie manche Objekte aussehen und welche Form sie haben. Wenn wir dann irgendwann die Form eines Objekts nur unvollständig sehen, liegt entweder ein Defekt im visuellen System vor, oder, was viel wahrscheinlicher ist, werden wir erkennen, dass vor diesem Objekt noch etwas anderes liegt. Die Verdeckung von Objekten durch andere Objekte ist nur ein Beispiel, wie wir Tiefe rekonstruieren können. Tiere mit einem frontalen Augenpaar, zu denen wir auch gehören, haben teilweise überlappende visuelle Felder und können stereoskopische Information nutzen, um Tiefe zu sehen. Aber auch mit nur einem Auge kann man Tiefe erkennen, denn die physikalische Umwelt bietet dem Betrachter eine Fülle von optischen Gesetzmäßigkeiten, die mit dem Abstand einhergehen. Man spricht dann von Hinweisreizen, Cues oder Informationsquellen und meint damit einfach solche Stimuluskonfigurationen im visuellen Feld, die zu einem Eindruck von Tiefe führen können. Und es sind ein Menge Hinweisreize identifiziert worden. Wie man in Abbildung 1.1. sehen kann, können die Hinweisreize zur Tiefenwahrnehmung danach geordnet werden, ob sie statischer oder dynamischer Natur sind.

Dies wäre eine schlechte Einleitung, würde es in dieser Arbeit nicht um diese Tiefencues gehen. Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf die dynamischen der monokularen Hinweisreizen und auf deren Rolle in der Steuerung der Lokomotion. Dynamisch bedeutet in diesem Zusammenhang nur, dass Bewegung in der Welt vorliegt, entweder weil sich ein Objekt oder der

Monokular	Statisch	Perspektive	Objektgröße Höhe im Bild Textur
		Verdeckung	Transparenz
		Beleuchtung	Schattierung Schatten
		Atmosphärische Effekte	Dunst Nebel Verblauung
		Fokussierung	Bildunschärfe Akkommodation
	Dynamisch	Optischer Fluss	
Binokular	Konvergenz	Statisch	
		Dynamisch	
	Disparität	Positionsdisparität	
		Orientierungsdisparität	
		Zeitliche Disparität	
	Monokulare Okklusion		

Abbildung 1.1. Monokulare und binokulare Hinweisreize zur dreidimensionalen Struktur, relativen Tiefe und Distanz (nach Howard & Rogers, 2002). Der gestichelte Kasten gibt den Schwerpunkt dieser Arbeit an. Die Spalten weiter rechts stellen Unterpunkte der links liegenden Spalten dar. Einige Hinweisreize besitzen starke Wechselbeziehungen zu anderen Hinweisreizen, so dass sie sich nicht streng hierarchisch aufteilen lassen.

Betrachter bewegt. Folgt man Nakayama (1985), so ist im Kontext der Biologie alles was sich bewegt, entweder Jäger oder Beute. Den Jäger sollte man vermeiden und die Beute fangen und verschlingen. Nach Nakayama ergeben sich eine Reihe biologischen Funktionen der Bewegungswahrnehmung, die so fundamental zu sein scheinen, dass sie fast für jedes Tier mit einem visuellen System gelten können:

- Bewegte Objekte können durch Bewegungswahrnehmung lokalisiert und identifiziert werden, um entsprechend die angemessenen Handlungen einzuleiten.
- Bewegungswahrnehmung dient der Trennung zwischen Figur und Grund, und somit der Entdeckung eines getarnten Objektes.
- Die Art wie ein Objekt seine Erscheinung ändert, während es sich bewegt, gibt genauen Aufschluss über seine dreidimensionale Beschaffenheit.
- Die Bewegungswahrnehmung kann durch die kontinuierliche visuelle Rückmeldung während der Fortbewegung wichtige Informationen zur Orientierung in der und durch die Umgebung liefern.

Die Bedeutung der Bewegungswahrnehmung kann auch daran ermesssen werden, dass viele Spezies keine Farbwahrnehmung haben oder über keine stereoskopische Wahrnehmung verfügen, aber bislang nicht gezeigt wurde, dass irgendein Tier mit einem visuellen System Bewegung nicht erkennen kann (Nakayama, 1985).

Der letzte Punkt in der Auflistung der biologischen Funktionen ist auch der Kern dieser Arbeit. Es geht darum, welche Informationen durch die Bewegungswahrnehmung vermittelt werden und wie diese genutzt werden um Orientierung in der Umgebung zu gewährleisten. Unter den dynamischen monokularen Cues in Abbildung 1.1. ist der optische Fluss aufgelistet. Dieser Hinweisreiz ist als eine der potentesten Informationsquellen für die Kontrolle der Lokomotion vorgeschlagen worden. Im folgenden Teil dieser Einleitung soll gezeigt werden, welche Eigenschaften der optische Fluss besitzt, um die Bewegungsrichtung anzuzeigen, und dass physiologische Mechanismen existieren, mit denen diese Eigenschaften wahrgenommen werden können. Es soll weiterhin gezeigt werden, dass Menschen die Fähigkeit besitzen, die Bewegungsrichtung aus der optischen Flussinformation mit einer ausreichenden Genauigkeit zu extrahieren, wenn sie dazu aufgefordert werden, es aber sehr wenig Belege gibt, dass sie es in einer realen Situation tatsächlich tun. Gleichzeitig wird eine Reihe weiterer Informationsquellen aufgezeigt, die insbesondere beim Fahren wichtig sein könnten und die Nutzung des optischen Flusses überflüssig machen könnten. Von der Frage ausgehend, ob optischer Fluss überhaupt für die Kontrolle der

Lokomotion verwendet wird, soll zu den Experimenten übergeleitet werden, die in dieser Arbeit dazu beschrieben werden.

Optischer Fluss

Beziehung Bewegungsparallaxe zu optischen Fluss

Der Begriff *Parallaxe* (griechisch für Veränderung und Vertauschung) hat seinen Ursprung in der Astronomie und bezeichnet die perspektivische Verschiebung entfernter Objekte in unterschiedlicher Tiefe aufgrund der Veränderung der Beobachterposition. In der Wahrnehmungsforschung wird dagegen eher der Begriff *Bewegungsparallaxe* verwendet, die das gleiche beschreibt, aber deutlicher die Bewegung des Beobachters betont. Helmholtz (1910) bemerkte, dass die Bewegungsparallaxe Informationen über die Entfernung zwischen einem Beobachter und den Objekten in der Umgebung liefert. Macht man eine fotografische Aufnahme von zwei Objekten, die in unterschiedlicher Entfernung liegen und vergleicht diese mit einer Aufnahme, die von einer seitlich zur ursprünglichen Position verschobenen Stelle aus gemacht worden ist, dann stellt man fest, dass sich der Abstand zwischen den Objekten auf dem Bild verändert hat. Insbesondere wird das nähere Objekt eine größere Veränderung zum Bildrand aufweisen als das entfernte, vorausgesetzt man hat die Kamera nur versetzt, nicht aber ihre Richtung verdreht.

Gibson (1950) hingegen stellte fest, dass außer der Bestimmung von Entfernung, mittels der Bewegungsparallaxe auch die Bewegungsrichtung, des Beobachters ermittelt werden kann, das so genannten *Heading*¹ (Gibson, 1950). Gibson (1966) bezeichnete die optische Transformation der Oberflächen der Umgebung während der Fortbewegung *optischen Fluss*. Optischer Fluss ist die auf die Bildebene projizierte Relativbewegung zwischen dem Beobachter und den sichtbaren Raumpunkten. Um im Kamerabeispiel zu bleiben, ist optischer Fluss vereinfachend gesagt, was man auf einer Fotografie sieht, wenn man die Kamera vor das Auge hält, die Blende öffnet, einen Schritt nach vorne macht und die Blende wieder schließt.

Welcher Unterschied besteht zwischen der Bewegungsparallaxe und dem optischen Fluss? Nach Nakayama und Loomis (1974) ist es nur eine Frage der Betonung. Der Begriff Bewegungsparallaxe bezieht sich auf die relative optische Versetzung zweier Punkte in der Umgebung. Gemäß der Weise, wie sie definiert ist, betont sie nur eine kleine Anzahl von Objekten. Im Gegensatz dazu bezieht sich das Konzept des optischen Flusses auf die

1) Die Begriffe *Bewegungsrichtung*, *Heading* (die englische Bezeichnung für *Gierung*) oder *Headingrichtung* werden äquivalent verwendet.

Gesamtheit der optischen Veränderungen, welche durch die Änderung der Beobachterposition entstehen.

Struktur des optischen Flusses

Wie kann nun die Bewegungsrichtung über optischen Fluss bestimmt werden? Betrachtet man eine einfache Bewegungssituation, wie die der senkrechten und geradlinigen Annäherung an eine Wand (siehe Abbildung 1.2.a), erkennt man auf Anhieb die Regelmäßigkeit des dabei entstehenden optischen Flusses. Alle Bildpunkte, welche Texturelemente einer Wand repräsentieren sollen, bewegen sich in diesem Fall radial nach außen und scheinen einem zentralen Punkt zu entspringen. Dieses Zentrum des Auseinanderfließens wird auch *Expansionsfokus* genannt (focus of expansion, FOE), und seine Lage gibt die gegenwärtige Bewegungsrichtung an (Calvert, 1954; Gibson, 1950). Dem Expansionsfokus schreibt Gibson eine besondere Funktion zur Kontrolle der Bewegungsrichtung zu: „(...) um zu lenken, halte man das Zentrum des Auseinanderfließens außerhalb solcher Stellen in der optischen Anordnung, die Barrieren, Hindernisse und Stufen kennzeichnen und innerhalb solcher Bereiche, die einen Durchgang anzeigen“ (Gibson, 1982, S. 250). Die Ansteuerung eines Ziels wird entsprechend erreicht. Man muss nur gewährleisten, dass der Expansionsfokus mit dem anvisierten Ziel zu jeder Zeit übereinstimmt. Das Resultat wird eine geradlinige Bewegung auf das Ziel sein.

Jede Art von Eigenbewegung kann in zwei Komponenten zerlegt werden, in eine Translation und eine Rotation. Eine reine Translation produziert ein optisches Flussfeld, das radial expandiert (siehe Beispiele a-c in Abbildung 1.2.), und dabei gibt der FOE die gegenwärtige Bewegungsrichtung an. Die Länge der Flussvektoren in einem solchen *translatorischen Flussfeld* hängt vom Abstand der Umweltelemente ab. Durch eine reine Rotation, wie z.B. bei einer Drehung um die eigene Körperachse, wird ein *lamellares* oder *rotatorisches* Flussfeld produziert. Dieser optische Fluss besteht aus parallelen Flussvektoren in die gleiche Richtung, und er beinhaltet keinen Expansionsfokus. Die Länge der Flussvektoren hängt dabei nicht vom Abstand der Elemente ab, und deshalb kann ein rotatorisches Flussfeld, im Gegensatz zum translatorischen Flussfeld, keine Informationen über die dreidimensionale Struktur der Umgebung liefern.

Eine Kurvenfahrt (kurvilineare Translation) kann als eine Summe aus einer Translation und einer Rotation aufgefasst werden, und das dabei resultierende Flussfeld ist dann eine Überlagerung eines translatorischen mit einem rotatorischen Flussfeld (Abbildung 1.2.d). Die Addition der Rotationskomponente kompliziert die Struktur des Flussfelds. Im Fall einer kurvilinearen Translation über einer flachen Ebene existiert kein

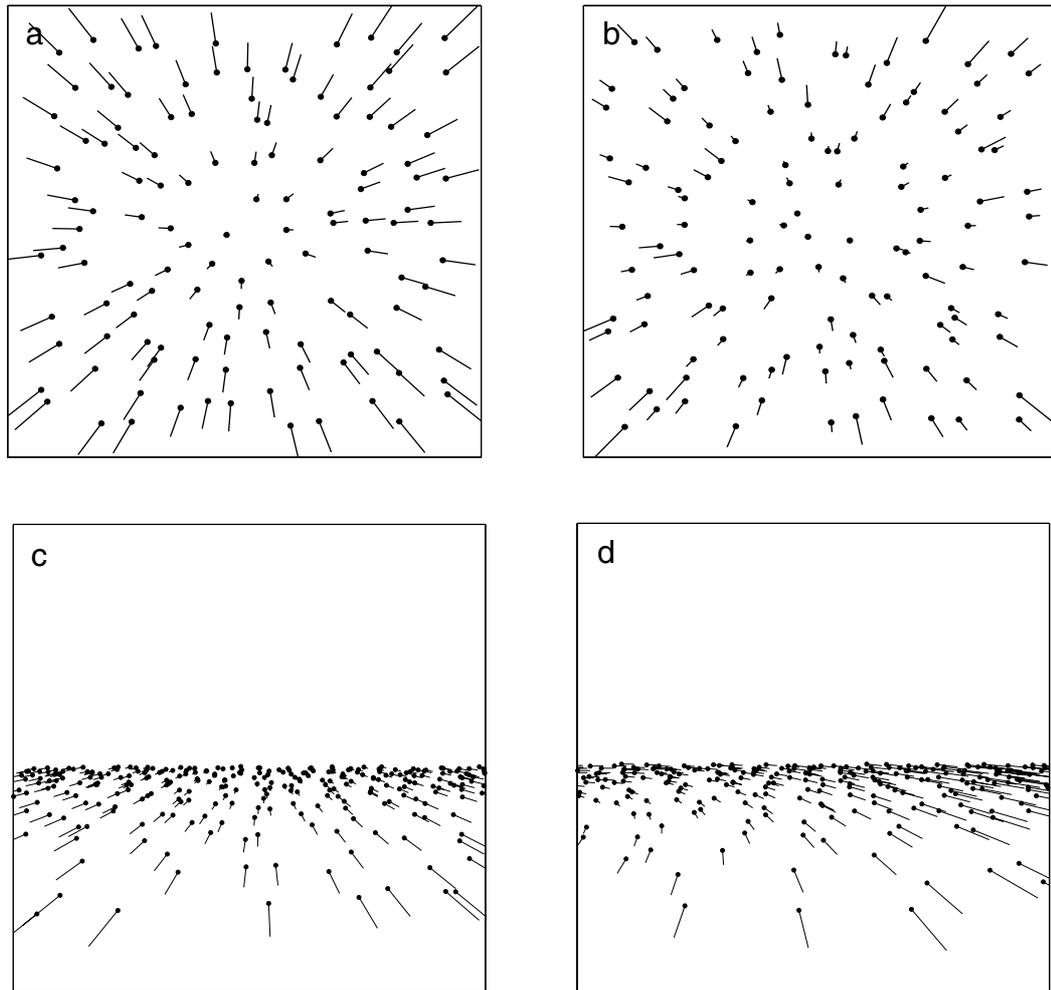


Abbildung 1.2. Optischer Fluss in der Bildebene bei linearer Bewegung (a) senkrecht auf eine Wand, (b) durch ein Punktevolumen, (c) parallel über eine Grundebene und (d) bei einer kurvilinearen Fahrt. Zufällig verteilte Raumpunkte wurden auf einer frontoparallelen Ebene perspektivisch abgebildet. Die Linien charakterisieren Richtung und Geschwindigkeit (= Länge der Vektoren) dieser Elemente. Die gegenwärtige Bewegung ist in allen Beispielen auf die Mitte der Bildfläche gerichtet. Bei einer Bewegung senkrecht auf eine Ebene ist die Geschwindigkeit im optischen Fluss abhängig von der Exzentrizität der Bildpunkte und wird bei einer Exzentrizität von 45° maximal. Bei Bewegung durch ein Punktevolumen und über eine Ebene dagegen, verringert sich die optische Flussgeschwindigkeit mit zunehmenden Abstand der Elemente vom Beobachter. In (d) ist die Translation aus (c) mit einer Rotation um die Hochachse überlagert worden.

Expansionsfokus (FOE) mehr, den man mit der gegenwärtigen Bewegungsrichtung gleichsetzen könnte.

Der optische Fluss wie bei einer Kurvenfahrt kann auch durch eine Kombination von Translation und Augenbewegungen erreicht werden, da Augenbewegungen ebenfalls eine Rotationskomponente addieren. Bewegt sich ein Beobachter geradlinig über eine flache Ebene, und fixiert oder verfolgt dabei ein Objekt in Augenhöhe, resultiert ein Fluss, der identisch ist

zum momentanen optischen Fluss bei einer Kurvenfahrt ohne Augenbewegungen. Da der Fluss in diesem Fall auf der Retina abgebildet ist, statt auf einer frontoparallelen Abbildungsfläche, spricht man vom *retinaler Fluss*. Wichtige Fragen, die in diesem Zusammenhang erörtert wurden, waren, wie bei einer kurvilinearen Translation die Bewegungsrichtung entdeckt werden kann, wie Menschen zwischen einer Translation plus Augenbewegung von einer kurvilinearen Translation unterscheiden können, und wie die Bewegungsrichtung während Augenbewegungen wahrgenommen wird und welche Rolle dabei extra-retinale Signale über Augenposition und Augenbewegung spielen (Grigo & Lappe, 1998; Royden, Banks, & Crowell, 1992; Royden, Crowell, & Banks, 1994).

Das Konzept und die möglichen Strukturen des optischen Flusses wurde später mathematisch präziser definiert (Koenderink, 1986; Koenderink & van Doorn, 1987). Der optische Fluss, der aus einer Relativbewegung zwischen einem Beobachter und Umweltobjekten entsteht, kann auf der Bildebene in vier Komponenten zerlegen werden (siehe auch Abbildung 1.3.):

- Reine Rotation (a)
- Uniforme Translation (rotatorischer Fluss, b)
- Reine Divergenz (radiale Expansion, translatorischer Fluss, c)
- Deformation / Scherung (d)

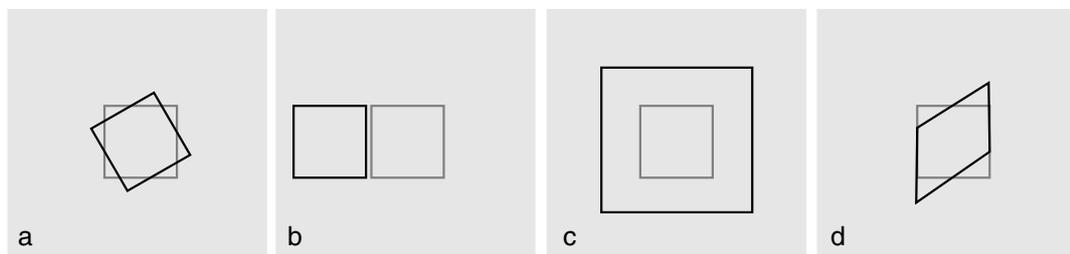


Abbildung 1.3. Komponenten der Relativbewegung zwischen Objekt und Beobachter: (a) Rotation, (b) Translation, (c) Divergenz und (d) Scherung.

Während Translation und Divergenz besonders wichtig für die Entdeckung von Objektbewegung und der Bewegung eines Beobachters in einer dreidimensionalen Welt sind, kann Scherung Informationen zur Tiefenrekonstruktion eines Objekts und zur Entdeckung von dreidimensionalen (gekrümmten) Oberflächen liefern. Reine Rotation tritt beispielsweise dann auf, wenn der Kopf um die Sichtlinie gedreht wird. Es war auch mit die mathematische Formulierung, die dazu führte, dass das Konzept des optischen Flusses auch in anderen Bereichen Verbreitung fand, wie dem des maschinellen Sehens (z.B. Aloimonos, 1993, Huber, Franz, & Bühlhoff, 1999; Murray & Buxton, 1990; Neumann, 2002).

Physiologische Verarbeitung von Bewegung und optischen Fluss

Die strukturierteste Umwelt und die eleganteste Theorie würde nichts helfen, wenn der Betrachter nicht im Stande wäre, die relevante Information aufzunehmen und zu verarbeiten. Es sind viele Areale im Gehirn identifiziert worden, die bei der Verarbeitung von Bewegungsinformation involviert sind, und manche davon scheinen auf die spezifische Strukturen des optischen Flusses zu reagieren.

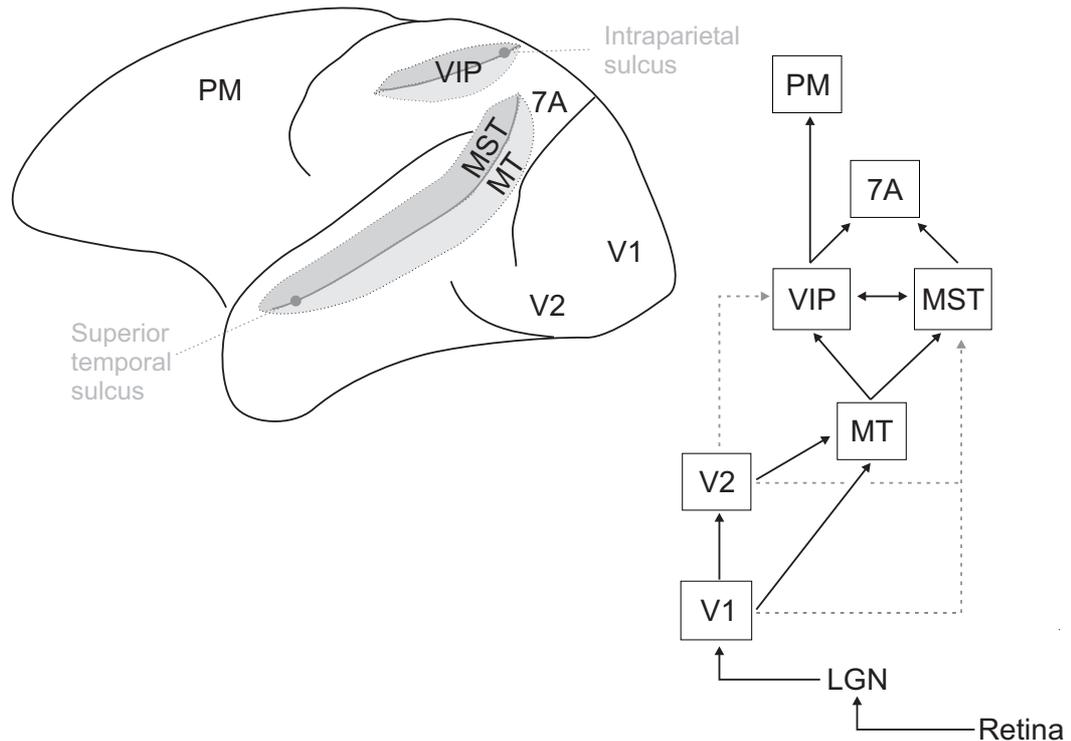


Abbildung 1.4. Links: Bewegungssensitive Areale im Gehirn vom Makkakenaffen (linke Hirnhälfte). Der Sulcus temporalis superior und der Sulcus intraparietalis sind aufgeklappt (grau unterlegte Bereiche), um die Lage der darin befindlichen Strukturen darzustellen. Rechts: Blockdiagramm der wichtigsten Verbindungen zwischen den bewegungssensitiven Bereichen im dorsalen Verarbeitungspfad. Die gestrichelten Linien zeigen schwächere Verbindungen. LGN: Corpus geniculatum laterale (seitlicher Kniehöcker). V1, V2: okzipitale Hirnrindengebiete. MT: medialer Temporallappen. MST: medialer Teil des oberen Temporallappens. VIP: ventraler Teil des intraparietalen Sulcus. PM: prämotorischer Kortex (nach Bremner, Duhamel, Ben Hamed, & Graf, 2000).

Die Abbildung 1.4. gibt einen Überblick über die wichtigsten Areale im Gehirn, die Bewegungssensitivität zeigen. Die Bewegungsverarbeitung fängt schon in der Retina an. Eine Klasse von Amakrinzellen zeigt eine richtungsselektive Antwort, und das Modell eines elementaren Bewegungsdetektors (Reichardt-Detektor, siehe auch Kap. 3) scheint darin implementiert zu sein (Euler, Detwiler, & Denk, 2002). Visuelle Information gelangt über den seitlichen Kniehöcker in den primären visuellen Kortex (V1), in denen

Zellen selektiv auf lokale Bewegung in eine Vorzugsrichtung antworten (Hubel & Wiesel, 1962).

Für die Verarbeitung von optischem Fluss scheinen die höheren Areale im visuellen System der Primaten besser ausgerüstet zu sein. Dabei treten die Areale MT (mittlerer Temporallappen) und MST (medialer Teil des superiores Temporallappens) besonders hervor. Die rezeptiven Felder der Area MT sind größer als in V1. Hier finden sich viele richtungselektive Neurone vor allem für zentrifugale Bewegung, und manche zeigen eine ausgeprägte Antwort bei einer bestimmten Geschwindigkeit (Perrone & Thiele, 2001). Von der Area MT projizieren viele Neurone in die Area MST. Neurone in diesem Areal antworten selektiv auf radiale Flussmuster und auf großflächige Bewegung. Dabei haben Neurone im dorsalen Anteil der Area MST (MSTd) folgende interessante Eigenschaften (nach Shenoy, Bradley, & Andersen, 1999):

- Große rezeptive Felder, oft über 50° Durchmesser.
- Selektive Antworten auf verschiedene Klassen von optischen Flussmustern, wie expandierenden, kontrahierenden, rotierenden und spiralförmigen Mustern.
- Selektivität auf optischen Fluss hängt nicht von der Form der bewegten Reize ab (Neurone antworten auf Zufallspunktemuster, Linien usw.).
- Antworten werden durch die Position des Expansionsfokus im rezeptiven Feld moduliert.
- Mikrostimulation von expansionsselektiven Neuronen bei Affen beeinflussen systematisch die Headingurteile.
- Signale über Augenposition und Kopfdrehung, sowie vestibuläre Signale aufgrund translatorischer Bewegung gelangen in diese Bereiche und modulieren die Neuronenantwort.

Der letzte Punkt ist interessant, da dadurch manche Ambiguitäten im optischen Fluss aufgelöst werden könnten, wie die Frage, ob die visuelle Bewegung durch ein bewegtes Objekt oder einen bewegten Beobachter entstanden ist. All diese Eigenschaften weisen darauf hin, dass die Area MSTd globale Information aus dem optischen Fluss verarbeitet und grundsätzlich die Potenz besitzt, Headinginformation zu kodieren. Detailliertere Ausführungen über die Repräsentation und Verarbeitung von Bewegungsinformation auf der Basis zahlreicher physiologischer Arbeiten bieten die Zusammenfassungen von Tanaka (1998) und Bremmer et al. (2000). Insbesondere auf die Bedeutung der Area MT für die Bewegungsverarbeitung und auf das Problem der Integration von verschiedenen visuellen Hinweis-

reizen für die Detektion von Bewegung (Textur, Farbe, Helligkeit) geht der Übersichtsartikel von Croner und Albright (1999) ein.

Aufgaben bei denen optischer Fluss eine Rolle spielt

Optischer Fluss kann aber nicht nur für die Schätzung der Bewegungsrichtung (Heading) genutzt werden. In der Literatur wird eine große Zahl an Aufgaben beschreiben, die durch den optischen Fluss systematisch beeinflusst werden. Großflächiger optischer Fluss kann beim Beobachter ein starkes Gefühl der Eigenrotation (Zirkularvektion) und der Eigentranslation (Linearvektion) auslösen (Berthoz, Pavard, & Young, 1975; Brandt, Dichgans, & Koenig, 1973; Dichgans & Brandt, 1978; Telford, Spratley, & Frost, 1992). Kleinkinder, die gerade erst angefangen haben zu laufen, können durch ein expandierendes Flussmuster dazu gebracht werden umzufallen (Bertenthal & Bai, 1989; Lee & Aronson, 1974). Erwachsene werden durch eine sich bewegende Bodentextur in ihrer Körperhaltung und in ihrem Gleichgewicht gestört (Flückinger & Baumberger, 1988), und es lassen sich Änderungen in der Laufgeschwindigkeit provozieren (Prokop, Schubert, & Berger, 1997). Optischer Fluss scheint ferner für Navigationsaufgaben hilfreich zu sein (Kearns, Warren, Duchon, & Tarr, 2002; Kirschen, Kahana, Sekuler, & Burack, 2000).

Speziell die Geschwindigkeitsinformation im optischen Fluss kann dazu genutzt werden, den Zeitpunkt einer Kollision (time-to-collision) vorherzusagen (Andersen, Cisneros, Atchley, & Saidpour, 1999; Cavallo & Laurent, 1988; Gray & Regan, 1998; Lee, 1976). Vielleicht mit am spannendsten sind die Befunde, dass Bienen die Geschwindigkeit des optischen Flusses dazu nutzen, die zurückgelegte Distanz zu messen (Srinivasan, Zhang, Altwein, & Tautz, 2000), wobei Menschen diese Fähigkeit auch zu besitzen scheinen (Bremmer & Lappe, 1999; Redlick, Jenkin, & Harris, 2001). Später wird in dieser Arbeit darauf eingegangen, dass Bienen über die Geschwindigkeitsinformation im optischen Fluss ihre Flugbahn kontrollieren können (Srinivasan, Lehrer, Kirchner, & Zhang, 1991).

Wegen dieser Vielzahl an Aufgaben, die mit optischem Fluss in Verbindung stehen, sollte dann das Argument mit Vorsicht betrachtet werden, dass die physiologische Existenz von Neuronen, die ein expandierendes Muster signalisieren können, eine Evidenz dafür sei, dass Menschen ihre Bewegungsrichtung über optischen Fluss bestimmen. Die Fähigkeit der globalen Verarbeitung der Bewegungsinformation mit MST-Neuronen könnte auch anderen Aufgaben als der Schätzung der Bewegungsrichtung dienlich sein. Einige Eigenschaften dieser Neurone könnten beispielweise genauso gut für die Kontrolle des Gleichgewichts verwendet werden.

Headingschätzung

Es wurde geschätzt, dass für viele alltägliche Bewegungsarten die Genauigkeit der Headingschätzung unterhalb 4° liegen muss (Cutting, Springer, Braren, & Johnson, 1992), und für manch anspruchsvollere Aufgabe, wie die einer Autofahrt bei hoher Geschwindigkeit oder der Landung eines Flugzeugs, sollte sogar mindestens eine Genauigkeit von 1° gewährleistet sein (Cutting, 1986). Frühe experimentelle Untersuchungen konnten keine Evidenz für die geforderte Genauigkeit liefern. Die durchschnittlichen Headingfehler waren relativ groß (5° - 10°), und wurden noch schlechter, wenn die Anzeige keinen sichtbaren Rahmen besaß oder die simulierte Geschwindigkeit der Punktemuster erniedrigt wurde (Johnston, White, & Cumming, 1973; Llewellyn, 1971). Folglich wurde der optischen Fluss nicht als reliabler Hinweisreiz für die Richtungsschätzung eingestuft: „In this light, a safe conclusion appears to be that optical expansion is a useful visual stimulus for the *fact* of locomotion - and probably for its basic features, such as approach, retreat, or progression parallel to a surface - but that it is, at best, a weak stimulus for the *goal* of locomotion“ (Johnston, White, & Cumming, 1973, S. 322). Erst mit der Verwendung einer Diskriminationsaufgabe, anstatt dem bis dahin üblichen direkten Anzeigen der Bewegungsrichtung, wurden Headingschätzungen mit einem Fehler von weniger als 1° erreicht (Warren, Morris, & Kalish, 1988). Auch bei der Diskrimination der Headingrichtung auf einer kurvilinearen Bahn wurden Leistungen in einer ähnlichen Größenordnung nachgewiesen (Warren, Mestre, Blackwell, & Morris, 1991b). Ab da explodierte die Anzahl psychophysischer Arbeiten zur Headingwahrnehmung. In der Folgezeit sind einige wichtigen Fragen im Zusammenhang mit der Headingschätzung aus optischen Fluss identifiziert wurden. Einige davon werden nachfolgend kurz erläutert.

Geschwindigkeit im optischen Fluss

Die Geschwindigkeit der Elemente im optischen Fluss bei einer linearen Translation ist durch folgende Beziehung bestimmt.

$$\frac{d\theta}{dt} = (\sin\theta)^2 \cdot \frac{v}{x}$$

Dabei ist v die Vorwärtsgeschwindigkeit der Beobachters, x der Abstand des Objektes senkrecht zur Bewegungsrichtung und θ der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und der Richtung zum optischen Element (siehe auch Abbildung 1.5.). Je größer die Vorwärtsgeschwindigkeit des Betrachters und je kleiner der Abstand der Umweltelements, um so größer ist die Geschwindigkeit im optischen Fluss.

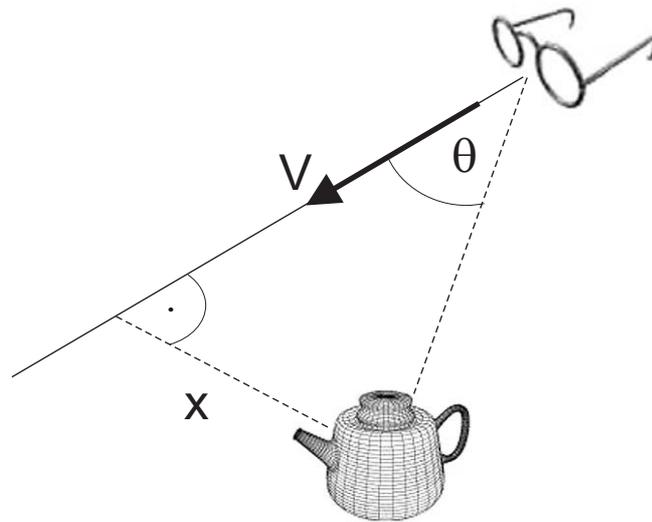


Abbildung 1.5. Die Winkelgeschwindigkeit eines Objektes (Teekanne) wird bestimmt durch die Vorwärtsgeschwindigkeit v eines Beobachters (Brille), dem Passierabstand x und der Exzentrizität θ des Objekts.

Bei größerer Expansion und Rotation, und damit höheren Geschwindigkeiten, erhöht sich die Genauigkeit, mit der man den singulären Punkt in einem Flussfeld anzeigen kann (te Pas, Kappers, & Koenderink, 1998). Die Headingdiskrimination scheint dagegen weder bei geradliniger Bewegung noch auf einer Kurvenbahn von der simulierten Vorwärtsgeschwindigkeit abzuhängen (Warren et al., 1991b; Warren et al., 1988). Wenn die Geschwindigkeit der individuellen Punkte im optischen Fluss randomisiert wird, aber die Bewegungsrichtungen der Punkte unverändert bleiben, sind die Leistungen der Probanden nicht gemindert. Die Leistung in der Headingdiskrimination fällt jedoch auf Zufallsniveau ab, wenn die Geschwindigkeit der Punkte beibehalten, aber ihre Bewegungsrichtung randomisiert wird. Aus diesen Ergebnissen wurde abgeleitet, dass die *globale Struktur* des optischen Flusses und nicht die Geschwindigkeit seiner Elemente für die Bestimmung der Bewegungsrichtung von Bedeutung ist (Warren, 1998a; Warren, Blackwell, Kurtz, Hatsopoulos, & Kalish, 1991a). Das deutet auch darauf hin, dass größere Bereiche des visuellen Feldes für die Headingschätzung einbezogen werden und nicht nur die Lage des Expansionsfokus allein.

Retinale Exzentrizität

Spielt es eine Rolle in welchen Bereichen der Retina sich der Expansionsfokus eines optischen Flussfelds befindet? Erste Experimente deuteten auf eine *retinale Invarianz* der Headingwahrnehmung, da die Diskriminationsleistung nicht bedeutsam abnahm, wenn der FOE eines radialen Musters exzentrisch präsentiert wurde, wohl aber, wenn der FOE außerhalb des

Computermonitors lag (Crowell & Banks, 1993). Spätere Arbeiten konnten jedoch mit abgewandelten experimentellen Methoden zeigen, dass die Fovea die höchste Sensitivität besitzt und bereits bei einer niedrigen Kohärenz des Punktemusters (d.h. mit einer „verrauschten“ Darbietung, bei der sich ein Teil der Punktelemente in zufällige Richtungen bewegen) die Bewegungsrichtung erkennen kann (Atchley & Andersen, 1998; Atchley & Andersen, 1999). Dabei hängt die Headingdiskrimination allerdings nicht mit der Sehschärfe oder Vernier-Genauigkeit zusammen, die in zentralen Bereichen der Retina höher ist als in peripheren Bereichen (Atchley & Andersen, 1999).

Augenbewegungen

Wie bereits erwähnt, verändern Augenbewegungen den retinalen Fluss drastisch, und für die Headingschätzung steht nicht mehr eine einfache Strategie, wie die Lokalisation des FOE, zur Verfügung. Wie kann dann aber die Headingrichtung während Augenbewegungen geschätzt werden? Dazu existieren im Wesentlichen zwei Ansätze. Der erste Ansatz geht davon aus, dass unter bestimmten Umständen der retinale Fluss selbst in eine Translations- und ein Rotationskomponente zerlegt werden kann (Dekompositionsproblem). Der zweite Ansatz berücksichtigt zusätzlich „extra-retinale“ Informationen, wie propriozeptive Signale oder eine Efferenzkopie der motorischen Kommandos an die Augen, um die Rotationskomponente aus dem retinalen Fluss herauszurechnen. In beiden Fällen steht am Ende der reine translatorische Fluss, der einzig die Information über die Bewegungsrichtung trägt.

Das Paradigma, das zur experimentellen Überprüfung benutzt wurde, ist das der *simulierten Augenbewegungen*. Ein Beobachter sieht dabei optischen Fluss, der eine Vorwärtsbewegung inklusive Augenbewegung simuliert, wobei der Beobachter selbst keine Augenbewegungen ausführen darf. Die Idee ist dabei, dass der Beobachter die Bewegungsrichtung erkennen sollte, wenn allein die visuelle Information ausreicht, um die Translationskomponente zu ermitteln. Mit diesem Paradigma fand man, dass bei relativ niedrigen Rotationsgeschwindigkeiten der Augen von unter $1.5^\circ/\text{s}$, visuelle Information allein ausreicht, um die Headingrichtung zu bestimmen (Warren & Hannon, 1990), nicht aber bei höheren Rotationsgeschwindigkeiten von $2\text{--}10^\circ/\text{s}$ (Royden et al., 1992; Royden et al., 1994). In diesen Fällen wurde die simulierte Augenbewegung als kurvige Bewegung interpretiert und die Angaben wichen entsprechend systematisch vom richtigen Heading ab. Diese Frage ist allerdings nach Meinung mancher Autoren noch nicht endgültig geklärt, da das verwendete Paradigma nicht die extra-retinale Information eliminiert, sondern die visuelle Information in einen Konflikt mit ihr stellt, und ebenso weitere Faktoren, wie die Art der simulierten Umgebung, einbezogen werden müssen (Lappe, Bremmer, & van den Berg, 1999b).

Bewegte Objekte

Der optische und retinale Fluss wird durch bewegte Objekte in einer ansonsten stationären Szene lokal verändert. Bewegte Objekte scheinen allerdings kaum einen Einfluss auf die Headingwahrnehmung des Menschen zu haben, so lange diese Objekte nicht den zukünftigen Weg des Beobachters kreuzen. Nur wenn das Objekt den FOE überdeckte, ließen sich systematische Fehleinschätzungen beobachten (Royden & Hildreth, 1996; Warren & Saunders, 1995). Zwischen den Studien gab es jedoch Unterschiede bezüglich der Richtung der Beeinflussung, und die Ergebnisse wurden unterschiedlich interpretiert. Hildreth und Royden (1998) betonen die Robustheit der menschlichen Headingwahrnehmung und die Fähigkeit auch unter suboptimalen Bedingungen zu guten Richtungsschätzungen zu gelangen. Dagegen sehen Warren und Saunders (1995) in der wenn auch geringfügigen Beeinflussung eher ein Indiz dafür, dass die visuelle Szene nicht vor der Schätzung der Bewegungsrichtung segmentiert wird und favorisieren die Hypothese des *spatial pooling*, nach der zur Headingschätzung jede Bewegung im visuellen Feld integriert wird. Ähnlich sehen es auch Vaina und Rushton und liefern als weitere Evidenz die psychophysischen Leistungen des neurologischen Patienten R.A. Dieser zeigt sehr geringe Performanz bei Aufgaben, die eine Segmentierung einer Szene oder die Erkennung einer dreidimensionalen Struktur nur auf der Basis von Bewegung verlangen, aber keine Leistungseinbußen in der Headingschätzung (Vaina & Rushton, 2000). Eine Schädigung eines Mechanismus in einer frühen Stufe des Headingberechnungsprozesses sollte aber zu Leistungseinbußen führen, wenn die Hypothese stimmt, dass die Segmentierung der Szene in einen relevanten, stationären Teil und in einen irrelevanten, bewegten Teil vor der Headingschätzung erfolgt.

Modelle

Es wurden viele Modelle zur Headingschätzung vorgeschlagen, die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte haben und die sich entlang vieler Dimensionen unterscheiden. So können sie eher biologisch oder technisch motiviert sein, robust sein oder in wenigen Verarbeitungsschritten zu einer Headingschätzung gelangen, oder wenige Punkte statt das ganze visuelle Feld abtasten. Alle Modellen zielen darauf ab, die Rotationskomponente im optischen Fluss zu eliminieren. Beim Problem der Augenbewegungen wurden bereits zwei Klassen an Modellen unterschieden, je nach dem ob sie extra-retinale Information einbeziehen oder nicht (einen Überblick über viele Modelle geben Hildreth & Royden, 1998).

Ein Unterscheidungskriterium, das in dieser Arbeit noch von Relevanz sein wird, ist die Frage, wie die Modelle zur Headingschätzung mit beweg-

ten Objekten umgehen. Damit verbunden ist die Frage, ob sie über weite Bereiche des visuellen Felds Information integrieren oder die Headingrichtung nur lokal berechnen. Die Klasse der *Schablonen-Modelle* (template models) bauen darauf auf, dass insbesondere der translatorische Fluss eine regelmäßige, radiale Struktur aufweist. Ein Schablonen-Modell besteht dann aus Elementen, die jeweils die Bewegung bevorzugen, die einem solchen radialen Muster oder Teilen eines radialen Muster entspricht (z.B. Warren & Saunders, 1995). Diese Modelle summieren meist über größere Bereiche des visuellen Felds und berücksichtigen bewegte Objekte nicht explizit. Objektbewegung, vor allem über einen größeren Bereich, sollte diese Modelle systematisch in der ermittelten Headingrichtung beeinflussen. Die *Vektorsubtraktions-Modelle* bauen darauf auf, dass der translatorische Fluss von der Entfernung der Punkte in der Szene abhängt, während der rotatorische Fluss davon unabhängig ist. Deshalb kann die Rotationskomponente eliminiert werden, indem die Flussvektoren zweier Punkte, die sich in unterschiedlicher Tiefe befinden, voneinander abgezogen werden. Diese Klasse an Modellen berechnet deshalb die Vektordifferenz benachbarter Stellen, und die Headingrichtung entspricht der Stelle im Bild, in der sich diese Differenzvektoren kreuzen (Hildreth, 1992; Longuet-Higgins & Prazdny, 1980; Rieger & Lawton, 1985). Die Modelle sollten eine kleinere Anfälligkeit für bewegte Objekten zeigen, auch wenn hier Objektbewegung ebenfalls nicht explizit berücksichtigt wird: Die Headingrichtung wird entweder über mehrere kleine Bereiche im Bild berechnet, und diejenige Stelle wird als Headingrichtung genommen, für die die meisten Bereiche votieren (Hildreth, 1992) oder eine erste, ungefähre Headingrichtung wird über die gesamte Szene berechnet, um dann nochmal eine zweite Feinabschätzung vorzunehmen, die nur einen kleinen Bereich um die zuerst geschätzte Headingrichtung berücksichtigt (Royden & Hildreth, 1996). Eine weitere Eigenschaft, die diese Modelle von den Schablonen-Modellen unterscheidet, ist, dass sie aufgrund der Vektorsubtraktion implizit die visuelle Szene segmentieren.

Weitere Kontrollstrategien

Obwohl, wie bisher gezeigt wurde, sowohl aus theoretischer Sicht, von der empirischen Seite der Psychophysik wie auch von neuronaler Seite vieles dafür spricht, dass die Lokomotion über optischen Fluss gesteuert werden kann, gibt es kaum Belege dafür, dass Menschen optischen Fluss auch tatsächlich nutzen. Einerseits gibt es wenige experimentelle Arbeiten, die untersucht haben, ob und wie die Menschen bei Manipulation von optischen Fluss während ihrer aktiven Eigenbewegung reagieren, und nicht nur welche Urteile sie als rein passive Beobachter abgeben. Diese wenigen Arbeiten

konnten dann auch kaum Evidenz für die Nutzung des optischen Flusses liefern (Beusmans, 1995; Riemersma, 1981). Andererseits existieren auch andere Hinweisreize, die redundant zum optischen Fluss sind, und die sogar in den meisten Studien mit dem optischen Fluss konfundiert waren.

Einer dieser Hinweisreize ist die *subjektive Richtung* von Objekten, und damit ist der wahrgenommene Ort eines Objekts in egozentrischen Koordinaten gemeint. Zu den vielleicht zwei wesentlichsten Aufgaben bei der Eigenbewegung gehören die Erreichung eines bestimmten, sichtbaren Ziels und die Vermeidung von Hindernissen. Ein Ziel kann mit Hilfe dieses Hinweisreizes mit einer einfachen Strategie erreicht werden. Dazu muss man sich während der Eigenbewegung nur mit seiner Medianebene auf das Ziel ausrichten und es in dieser „Geradeaus-Richtung“ halten: Man läuft dann sozusagen schnurstracks auf das Ziel zu. Die Vermeidung von Hindernissen ist nicht schwieriger - einfach Hindernisse mit der Geradeaus-Richtung nicht überlappen lassen. Erst in jüngster Vergangenheit wurden der wahrgenommene Ort eines Objekts und der optische Fluss durch Verwendung von Prismenbrillen dissoziiert (Rushton, Harris, Lloyd, & Wann, 1998). Es zeigte sich dabei, dass Probanden, die auf ein Ziel zulaufen mussten, ausnahmslos der subjektiv wahrgenommenen Position des Zielorts folgten und optische Flusinformation vollständig vernachlässigten. Einige Folgearbeiten zur aktiven Eigenbewegung korrigierten diese Sicht ein wenig (Harris & Carre, 2001; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001; Wood, Harvey, Young, Beedie, & Wilson, 2000).

Speziell für das Führen von Fahrzeugen sind zwei weitere Cues vorgeschlagen worden, da in dieser Aufgabe die Fahrumgebung durch Seitenlinien und Fahrbahnbegrenzungen auffällige Merkmale bietet. Ein solcher Hinweisreiz ist der *Spreiz-Winkel* (splay angle), der Winkel, den eine Seitenlinie mit der Senkrechten im Bild formt (Abbildung 1.6.). Die Größe des Spreiz-Winkels einer Seitenlinie ist eine Funktion der Höhe eines Beobachters über dem Boden und des seitlichen Abstands zu der Seitenlinie: Je niedriger die Höhe und je größer der Abstand, desto größer ist der Spreiz-Winkel. Da ein Fahrer normalerweise eine konstante Höhe über dem Boden hat, kann auf gerader Straße über den Spreiz-Winkel direkt der Abstand zu den Seitenlinien geschätzt werden. Der Spreiz-Winkel kann somit auf recht einfache Weise für die Kontrolle der seitlichen Position verwendet werden.

Dabei muss ein Fahrer nicht unbedingt den Spreiz-Winkel explizit in einen seitlichen Abstand übersetzen: Um in der Mitte der Fahrbahn zu lenken, genügt es, dass die linke und rechte Seitenlinie in ihrer Orientierung symmetrisch sind. Ein weiterer Vorteil der Orientierung am Spreiz-Winkel ist, dass die relevante Information von zwei beliebigen Punkten entlang einer Seitenlinie entnommen werden kann. Es wurde experimentell gezeigt,

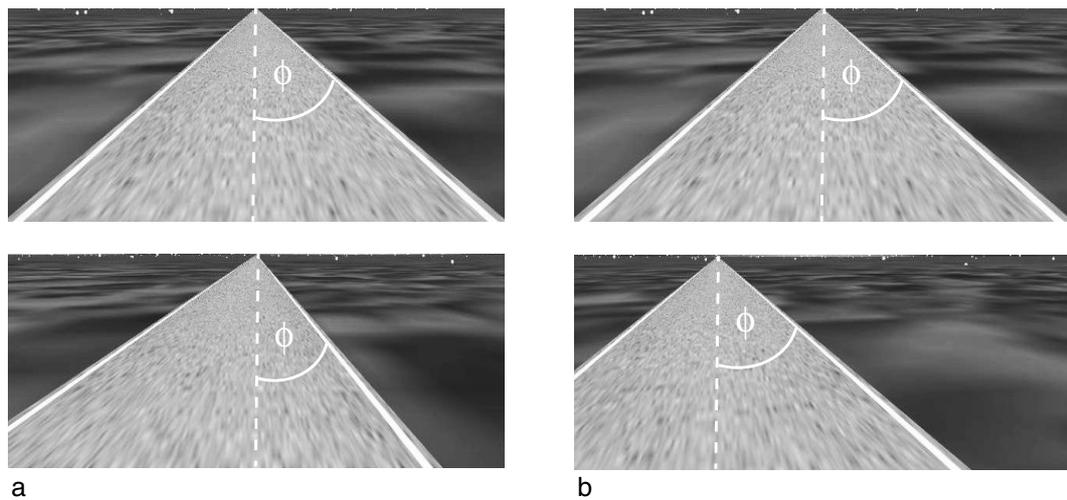


Abbildung 1.6. Spreiz-Winkel von Fahrbahnbegrenzungen. Laterale Positionsänderung (a): Bei der Annäherung an den rechten Seitenrand ändert sich die Orientierung der Seitenlinien, der Spreiz-Winkel ϕ wird kleiner. Bei Änderung der Bewegungsrichtung (b) bleibt der Spreiz-Winkel ϕ konstant - die Lage der Straße verschiebt sich allerdings insgesamt im Bild.

dass die Genauigkeit der Positionskontrolle nicht davon abhängt, ob entfernte oder nahe Straßenbereiche präsentiert werden (Beall & Loomis, 1996).

Bei Kurvenfahrten dagegen kann sich der Fahrer an der innersten Stelle der Fahrbahn orientieren, am sogenannten *Tangentenpunkt* der Kurve. Es wurde festgestellt, dass Fahrer 1-2 Sekunden bevor sie in eine Kurve fahren diesen Tangentenpunkt mit ihrem Blick aufsuchen und fixieren (Land & Lee, 1994). Je kleiner der Radius einer Kurve ist, desto exzentrischer im visuellen Feld des Fahrers liegt der Tangentenpunkt. Demzufolge könnte ein Fahrer über die Lage des Tangentenpunktes eine Abschätzung der Kurvigkeit des vorausliegenden Straßenabschnitts bekommen, und entsprechend seinen Lenkusschlag danach ausrichten. Eine Möglichkeit besteht darin, die Exzentrizität des Tangentenpunkts zur gegenwärtigen Bewegungsrichtung in Beziehung zu setzen (Land & Lee, 1994), oder zu einem anderen Referenzrahmen, wie den der Motorhaube oder des Rahmens der Karosserie (Wilkie & Wann, 2002). Befindet sich der Fahrer schließlich in der Kurve, signalisiert ihm ein Tangentenpunkt, der seine horizontale Lage *nicht* ändert, dass er sich auf richtigem Kurs befindet.

Die drei beschriebenen Hinweisreize sind keine dynamischen Cues wie der optische Fluss. Sie können vielmehr als bildhafte oder *piktoriale* Cues betrachtet werden. Sie verändern sich zwar in Abhängigkeit von der Eigenbewegung des Beobachters, kommen aber auch in einem statischen Bild wie in der Abbildung 1.6. vor. Aufgrund der relativ starken Evidenzen für piktoriale Cues, bzw. der wenigen Evidenz für dynamische Cues, wurden die für die Fahrzeugführung relevanten Hinweisreize folgendermaßen bewertet:

„The locations of the edges of the road in the field of view appear to provide the principal visual cues for steering. They are necessary and sufficient, and the rest of the flow-field does not seem to be involved in any very direct and essential way“ (Land, 1998, S. 178).

Ganz anders sieht die Sache bei der Flugkontrolle von Bienen aus. Bienen sind nicht auf statische Kanten angewiesen, sondern zeigen viele Verhaltensweisen, die über den optischen Fluss der Umgebung gesteuert werden (Srinivasan & Zhang, 2000). Sie kontrollieren beispielsweise ihren Flugweg in einem engen Korridor, indem sie die Geschwindigkeitsinformation im visuellen Feld nutzen. Bienen nutzen dabei aus, dass die Winkelgeschwindigkeit eines Umgebungsmusters invers proportional zum Abstand der Musters ist. Gleiche Winkelgeschwindigkeiten zu beiden Seiten signalisieren einen gleichen Abstand, und durch den Abgleich der Winkelgeschwindigkeiten, der sogenannten *Zentrierungsstrategie*, können Bienen auf einer Flugbahn fliegen, die ihnen einen maximalen Abstand zu den Hindernissen bietet. An diesem Beispiel erkennt man, dass die Verwertung eines bestimmten Hinweisreizes entscheidend davon abhängt, ob die Umwelt die entsprechende Struktur aufweist, damit die nötige Information entnommen werden kann. Die Standardsituation in den Experimenten zur Kontrolle des Fahrverhaltens war hingegen eine Bewegung über eine flache Ebene, in der einige Hinweisreize nicht besonders ausgeprägt sind. Bewegungsparallaxe, optischer Fluss und Geschwindigkeitsinformation treten deutlicher hervor, wenn die Umwelt Objekte mit einer sichtbaren vertikalen Ausdehnung enthält. Die experimentelle Beschränkung auf solche einfachen Szenen kann einer der Gründe sein, warum die Lage und Orientierung von Seitenlinien so hoch bewertet und als der *einzigste wesentliche* Hinweisreiz betrachtet wurden.

Zielsetzung und Aufbau dieser Arbeit

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, zu verstehen, welche Informationsquellen Fahrer für die Kontrolle der Fahrtrichtung und der Position auf der Straße verwenden. Ausgangspunkt bildet die Einschätzung von Land (1998), nach der der wichtigste visuelle Hinweisreiz die Lage und Orientierung der Seitenlinien ist. Es wird vermutet, dass die Struktur des optischen Flusses und die darin enthaltene Geschwindigkeitsinformation, weitere nutzbare und benutzte Informationsquellen sind. In einer Simulationsumgebung hatten die Probanden die Aufgabe, in der Mitte einer geraden Fahrbahn zu fahren. Dabei wurden potentielle visuelle Hinweisreize manipuliert und in einen Konflikt mit weiteren Informationsquellen gestellt. Dieser Ansatz erlaubte es, auftretende, *systematische* Reaktionen der Fahrer auf die Berücksichtigung des jeweiligen Hinweisreizes zurück zu führen.

In Kapitel 2 werden die wesentlichen Befunde zur geschwindigkeitsgesteuerten Zentrierungsstrategie bei Bienen beschrieben und Experimente vorgestellt, die die Nutzung der Geschwindigkeitsinformation im optischen Fluss auch beim Menschen untersuchen. Kapitel 3 baut auf den vorherigen Befunden auf, und untersucht die Frage, ob die Geschwindigkeit, die der Mensch wahrnimmt, von der räumlichen Struktur der Umgebung beeinflusst wird. In zwei psychophysischen Diskriminationsexperimenten wird dazu die Unterscheidungsfähigkeit für unterschiedliche Geschwindigkeiten, sowie die wahrgenommene Geschwindigkeit in Abhängigkeit von unterschiedlich breiten Mustern bestimmt (unterschiedliche Ortsfrequenzen).

In den Kapiteln 4 bis 6 wird getestet, ob die Bestimmung der Bewegungsrichtung über die Struktur des optischen Flusses erfolgt. Dazu wurde der optische Fluss der Fahrszene manipuliert, indem den Betrachtern ein zweites Flussfeld in Form eines Schneesturms oder eines Vogelschwarms präsentiert wurde. In Kapitel 4 wird der grundlegende Effekt dieser Manipulation beschrieben, und in den folgenden Kapiteln werden verschiedene Hypothesen über den zugrundeliegenden Wirkungsmechanismus getestet: In Kapitel 5 werden die Auswirkungen des manipulierten optischen Flusses sowohl auf die Schätzung der Bewegungsrichtung wie auch auf die Schätzung der subjektiven Geradeaus-Richtung untersucht, und in Kapitel 6 die Auswirkungen auf die Blickrichtung und Kopforientierung der Fahrer.

Das Verhalten auf weitere bewegte Objekte in der visuellen Szene untersucht schließlich Kapitel 7. Hier wird das bekannte Phänomen des Ausweichverhaltens bei entgegenkommenden Fahrzeugen erstmals in einer Simulationsumgebung repliziert. Dabei werden auch systematische Reaktionen in einer bislang nicht untersuchten Situation nachgewiesen, in der die Fahrer von anderen Fahrzeugen überholt werden. Die Resultate werden hinsichtlich einer Hypothese, die von einer engen Verbindung zwischen Blick- und Fahrrichtung ausgeht, diskutiert.

Es wurde versucht jedes Kapitel so aufzubauen, dass es weitestgehend eigenständig ist, so dass der Leser zum Verständnis der Experimente keine Informationen aus anderen Kapiteln benötigt. Eine Ausnahme hierzu bilden vielleicht die Experimente in Kapitel 3, die sich auf die Resultate von Kapitel 2 beziehen. Zur Eigenständigkeit der einzelnen Kapitel gehört auch, dass der erste Absatz jedes Kapitels in einer Kurzzusammenfassung die wesentlichen Resultate der nachfolgenden Experimente beschreibt.

BIENTUNNEL

Zwei Experimente werden vorgestellt, die die Bedeutung der Geschwindigkeitsinformation im visuellen Feld für die Kontrolle der Eigenbewegung untersuchen. Die Probanden hatten in diesen Experimenten die Aufgabe sich aktiv in der Mitte eines geraden Korridors zu positionieren. Die Geschwindigkeit der Seitenwände und die Ortsfrequenz des Wandmusters wurden dabei systematisch manipuliert und mit der Fahrleistung unter Bedingungen verglichen, in denen den Fahrern zusätzlich Information durch Seitenlinien zur Verfügung stand. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl durch ungleiche Wandgeschwindigkeiten als auch durch ungleiche Ortsfrequenzen die Fahrspur beeinflusst werden kann. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Fahrer sich nicht nur an den Fahrbahnbegrenzungen orientieren, sondern auch die Geschwindigkeit der Umgebung gezielt berücksichtigen.

Kontrolle der Bewegung durch Geschwindigkeitsinformation

Wenn Bienen durch einen Spalt, ein Fenster oder einen engen Korridor fliegen, bewegen sie sich meist durch die Mitte der Spalts oder entlang der Mitte des Korridors, so dass sie ihren Abstand zur linken und rechten Seite ungefähr gleich halten. Über welche visuelle Information und mit welchen Informationsverarbeitungsprozessen gelingt den Bienen dieses Verhalten? In einer Reihe von Experimenten gelang es Srinivasan und seinen Kollegen nachzuweisen, dass Bienen den Abstand zu den Hindernissen nicht direkt messen, sondern die Entfernung über die Bildgeschwindigkeit der Umgebung bestimmen (Kirchner & Srinivasan, 1989; Srinivasan et al., 1991).

Im Versuchsaufbau von Srinivasan et al. (1991) wurden Bienen trainiert, durch einen engen Korridor zu fliegen, dessen beide Seiten mit einem senkrecht orientierten Schwarz-Weiß-Muster ausgekleidet waren. Wurde die eine Seite des Korridors während des Durchflugs der Bienen entgegen ihrer Bewegungsrichtung bewegt, konnte man feststellen, dass die Bienen ihren

Abstand zu dieser Seite vergrößerten. Wurde dagegen eine Seite des Korridors in Flugrichtung der Biene bewegt, verkleinerten die Bienen grundsätzlich den Abstand dazu (Kirchner & Srinivasan, 1989). Durch die Bewegung der Seitenwand entgegen bzw. entlang der Flugrichtung wurde erreicht, dass die Winkelgeschwindigkeit des Korridormusters erhöht bzw. erniedrigt wurde. In einer natürlichen Umgebung ist die Winkelgeschwindigkeit der Umweltpunkte während des Vorbeiflugs abhängig vom ihrem Abstand zum Betrachter. Je kleiner der Abstand ist, umso größer ist die resultierende Winkelgeschwindigkeit auf der Retina bzw. die scheinbare Bildgeschwindigkeit in einer Projektion. Eine große Winkelgeschwindigkeit signalisiert somit indirekt einen kleinen Abstand, und die Experimente von Srinivasan et al. (1991) belegen, dass durch den Abgleich dieser Winkelgeschwindigkeiten auf beiden Seiten der Abstand zu den Seitenwänden geregelt und eine zentrale Flugbahn eingehalten werden kann.

Zwischenzeitlich musste ein Argument ausgeräumt werden, nach dem nicht die Bildgeschwindigkeit an sich für den Flugweg der Bienen entscheidend ist, sondern eine von der Geschwindigkeit abhängige Größe, nämlich die der Kontrastfrequenz (Egelhaaf & Borst, 1992). Die Kontrastfrequenz (KF) eines Musters bezieht sich auf die zeitliche Modulation der Helligkeitswerte und wird als das Produkt aus der Ortsfrequenz (OF) eines Musters und der Winkelgeschwindigkeit, mit der ein Muster bewegt wird, definiert. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt, wenn das Muster nicht verändert wird, auch zu einer Erhöhung der Kontrastfrequenz. Bei einer höheren Geschwindigkeit passieren sozusagen die Bildelemente häufiger den Betrachter. Eine Erhöhung der Kontrastfrequenz wird aber auch erreicht, wenn bei unveränderter Geschwindigkeit die Ortsfrequenz des Musters erhöht wird (siehe Abbildung 2.1.). Es wurde festgestellt, dass der Flugweg der Bienen nicht beeinflusst wurde, wenn die Bienen durch einen Korridor flogen, dessen Seiten mit Musters unterschiedlicher Ortsfrequenzen ausgekleidet waren (Srinivasan et al., 1991). Da sich in diesem Fall die Seiten in ihrer Kontrastfrequenz zwar unterschieden, aber kein Effekt auf die Flugbahn beobachtet wurde, konnte als die ausschlaggebende optische Größe für die Flugkontrolle die Kontrastfrequenz verworfen und die Bildgeschwindigkeit angenommen werden.

War die Fluggeschwindigkeit der Biene und die Geschwindigkeit, mit der eine Korridorseite bewegt wurde, bekannt, konnte man sogar vorhersagen in welchem Abstand von den Seitenwänden die Biene fliegen müsste. Insgesamt zeigen die Experimente mit Bienen, dass das visuelle System der Bienen im Stande ist, die Winkelgeschwindigkeiten von Umgebungsmustern wahrzunehmen und diese für ihre Flugkontrolle zu nutzen. Dieses

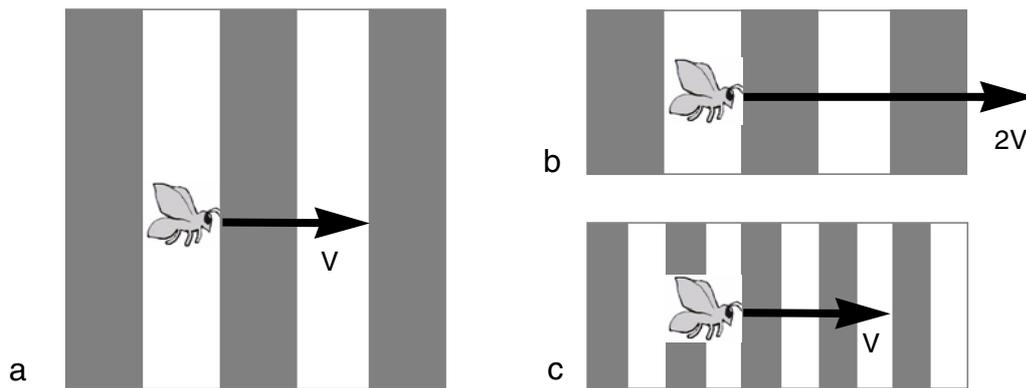


Abbildung 2.1. Abhängigkeit der Kontrastfrequenz von der Geschwindigkeit und der Ortsfrequenz eines Musters. In (a) bewegt sich eine Biene mit Geschwindigkeit $V = 1 \text{ c/s}$ ($c = \text{Periode}$) vor einem Muster mit der Ortsfrequenz OF . Während des Vorbeiflugs resultiert dabei eine Kontrastfrequenz $KF = 1 \text{ c/s} = 1 \text{ Hz}$. Durch eine Verdoppelung der Geschwindigkeit (b) verdoppelt sich auch die Kontrastfrequenz, hier auf 2 Hz . In (c) wird eine Verdoppelung der KF dadurch erreicht, dass die Geschwindigkeit V beibehalten, aber die Ortsfrequenz des Musters verdoppelt wird (\sim Halbierung der Wellenlänge).

Flugverhalten wurde unter dem Name *Zentrierungsreaktion* (centering response) bekannt (Srinivasan et al., 1991).

Anfangs wurde der Status der Zentrierungsreaktion als ein eigenständiges Kontrollsystem angezweifelt. Es wurde vermutet, dass das Verhalten der Bienen in den oben genannten Experimenten auch mit der bis dahin viel intensiver untersuchten und besser bekannten *optomotorischen Reaktion* der Fliegen erklärt werden könnte (Egelhaaf & Borst, 1992). Die optomotorische Reaktion der Fliege ist eine kompensatorische Orientierungsreaktion, bei der die Fliege auf eine großflächige visuelle Rotation (d.h. progressive visuelle Bewegung im visuellen Feld des einen Auges und regressive im anderen visuellen Feld) mit einer gegenläufigen Drehung antwortet (z.B. Egelhaaf, Kern, & Warzecha, 1998; Götz, 1964; Warzecha & Egelhaaf, 1996). Durch die optomotorische Reaktion kann die Fliege beispielsweise Verdrehungen ihrer Körperachse aufgrund von Windverwirbelungen ausgleichen und eine konstante Flugrichtung beibehalten. Die Eigenständigkeit der Zentrierungsreaktion bei Bienen wurde durch eine Reihe von Unterschieden zur optomotorischen Reaktion begründet (Srinivasan & Zhang, 1993), und die wichtigsten Unterschiede fassen Srinivasan und Zhang (2000) wie folgt zusammen: Während die Zentrierungsreaktion in erster Linie von der Winkelgeschwindigkeit abhängt, ist die optomotorische Reaktion eine Funktion der Kontrastfrequenz des Stimulus. Aus diesem Grund ist bei der optomotorischen Reaktion die Geschwindigkeit mit der Periode des Musters konfundiert (siehe auch Kapitel 3). Zweitens wird die Zentrierungsreaktion bei insgesamt höheren Kontrastfrequenzen und über einen größeren Frequenz-

bereich ausgelöst (25-100 Hz). Die optomotorischen Reaktion dagegen ist am stärksten bei einer Kontrastfrequenz von 25-50 Hz und ist bei 100 Hz praktisch nicht mehr zu beobachten. Schließlich ist die optomotorische Reaktion *richtungssensitiv*, d.h. ein Muster, das sich nach links bewegt, löst auch eine kompensatorische Drehung nach links aus. Die Zentrierungsreaktion dagegen ist überraschenderweise *nicht-direktional*. Das bedeutet, dass solange der Betrag der Geschwindigkeitsdifferenz beider Seiten gleich ist, wird das gleiche Verhalten bei den Bienen ausgelöst. Die Richtung der Bewegung ist nicht ausschlaggebend. Sowohl ein Muster, das langsam entgegen der Flugrichtung bewegt wird, wie auch ein Muster, das mit hoher Geschwindigkeit entlang der Flugrichtung bewegt wird, löst gleichermaßen eine Vergrößerung des Abstands zu dieser Seite aus. Die gleiche Abstandsvergrößerung wird beobachtet, wenn die manipulierte Seite nach oben oder unten, also senkrecht zur Flugrichtung, bewegt wird.

Einige weitere Reaktionen der Bienen hängen ebenfalls von der scheinbaren Geschwindigkeit der Umgebung ab. So reduzieren Bienen ihre Flugeschwindigkeit, wenn sie in einen zunehmend enger werdenden Trichter einfliegen. Da der Abstand zu den Wänden des Trichters immer kleiner wird, vergrößert sich die Winkelgeschwindigkeit auf der Retina beider Augen, was die Biene zu einer Geschwindigkeitsreduktion veranlasst (Srinivasan & Zhang, 1997). Schließlich können Bienen die Geschwindigkeit der Umwelt auf ihrer Retina während der Fluges dazu nutzen, Entfernungen von Futterstellen zu messen und diese dann anderen Bienen mitzuteilen (Srinivasan et al., 2000). Da Bienen ungefähr in einer gleichen Flughöhe fliegen, wird dabei die Tatsache ausgenutzt, dass die Integration der Geschwindigkeit über die Flugzeit proportional zur Entfernung der Futterstelle ist.

Man kann sich fragen, welche Relevanz die Befunde der Bienenexperimente für den Menschen haben. Nutzen Menschen ebenfalls die Geschwindigkeitsinformation um ihre Bewegung zu kontrollieren? Wenn ja, in welchen Situationen könnten sogar systematische Beeinflussungen erwartet werden? Sich bewegende Wände wie in den Bienenexperimenten von Srinivasan et al. (1991) kommen in der Natur schließlich nicht allzu häufig vor. Läge eine zur Zentrierungsreaktion vergleichbare Reaktion auch beim Menschen vor, wäre die Szene in Abbildung 2.2. eine potenzielle Situation, in der eine Strategie des Geschwindigkeitsabgleichs zu ungewollten, nachteiligen Reaktionen führen könnte.

In dieser Verkehrsszene resultiert beim Überholen des Lastwagens eine Bewegung im visuellen Feld, die sich zwischen der linken und rechten Bildhälfte stark unterscheidet. Während die relative Geschwindigkeit der Lärmschutzwände auf der linken Seite verhältnismäßig hoch ist, wird die Geschwindigkeit auf der rechten Seite durch die Vorwärtsbewegung des



Abbildung 2.2. Verkehrsszene in der die Winkelgeschwindigkeiten im visuellen Feld eine ungewollte Positionsänderung verursachen könnten. Die Winkelgeschwindigkeit (weiße Pfeilsymbole) des Lastwagens ist aufgrund seiner eigenen Vorwärtsbewegung niedriger als die der Lärmschutzwände auf der linken Seite. Aufnahme am Brüttiseller Kreuz bei Zürich, Schweiz.

Lastwagens reduziert. Gemäß einer Zentrierungsstrategie, bei der eine niedrigere Winkelgeschwindigkeit als größerer Abstand interpretiert wird, sollte man dann erwarten, dass Fahrer eine Tendenz besitzen, in Richtung des Lastwagens zu korrigieren. Andererseits macht die Abbildung 2.2. auch deutlich, dass weitere Informationsquellen in der Szene vorliegen, die einer solchen potenziellen Tendenz auch entgegenwirken könnten: Die Seitenlinien zeigen dem Fahrer an, dass er eigentlich in der Mitte seiner Fahrspur ist. Der Abstand zum Lastwagen kann auch über seine Größe oder der Höhe im Bild geschätzt werden. Schließlich kann ein größerer statt einem kleineren Abstand zum Lastwagen angebracht sein, wenn dem Lastwagen ein größeres Risiko beigemessen wird als den Lärmschutzwänden.

Bientunnel - erstes Experiment

Die Motivation zu dem folgenden Experiment folgt unmittelbar aus den Befunden zur Zentrierungsreaktion bei Bienen. Im Wesentlichen wird eine Replikation des Experiments von Srinivasan et al. (1991) vorgestellt, nur diesmal nicht mit Bienen, sondern mit menschlichen Probanden. Dazu wurde ein Fahraufgabe gewählt, um dadurch folgende Kernfragen zu untersuchen: Wird die seitliche Position des Fahrers von der Geschwindigkeit der Umgebung systematisch beeinflusst? Ist dann ein möglicher Einfluss so,

dass man von einer Zentrierungsstrategie beim Fahren sprechen kann? Das erste Ziel dieser Untersuchung war es daher, eine solche systematische Beeinflussung beim Menschen überhaupt nachzuweisen.

Gleichzeitig sollte das Fahrverhalten unter systematischer Manipulation weiterer Hinweisreize betrachtet werden. Als die wichtigste visuelle Information für die Kontrolle der Position beim Fahren wurde die Lage und Orientierung der Fahrbahnbegrenzungen im visuellen Feld vorgeschlagen (Beall & Loomis, 1996; Land, 1998). Welche Bedeutung hat ein möglicher Effekt der Geschwindigkeit, wenn er mit solchen starken Hinweisreizen wie Seitenlinien in Konflikt steht? Durch die Manipulation der Ortsfrequenz der Umgebung sollten ferner Hinweise erhalten werden, ob die Geschwindigkeitswahrnehmung abhängig von der Struktur der Umgebung ist, oder ob die Versuchsteilnehmer, ähnlich wie Bienen, aus der Bewegung der Umgebung ein reines Geschwindigkeitssignal extrahieren können.

Methoden

Zwölf Versuchspersonen im Alter zwischen 19 und 28 Jahren nahmen an diesem Versuch teil. Alle hatten einen Pkw-Führerschein und sieben gaben an, mehrmals in der Woche ein Kraftfahrzeug zu nutzen. Die Versuchspersonen erhielten für ihre Teilnahme eine Entschädigung von 13 DM/h.

Aufgabe

Mittels Maussteuerung sollten die Teilnehmer sich in der Mitte eines Korridors positionieren und bis zum Ende des Durchgangs versuchen, so genau wie möglich in der Mitte dieses Korridors zu fahren.

Visuelle Stimuli

Ein dreidimensionales Modell eines geraden Korridors, bestehend aus zwei senkrechten, parallel laufenden Seitenwänden, wurde erzeugt und auf einer Großbildleinwand dargestellt, die ein effektives Blickfeld von 180° in horizontaler und 50° in vertikaler Richtung hatte (weitere technische Details zu Projektion und Simulation im Anhang 1). Der Korridor war 10 m breit. Es waren dabei keine Kanten der Seitenwände sichtbar: Die oberen und unteren Kanten lagen außerhalb desjenigen Bereichs, der auf die Projektionsfläche abgebildet wurde (Abbildung 2.3.). Zusätzlich dazu wurde ab einer Tiefe von 120 m die Sichtbarkeit der Seitenwände zunehmend durch simulierten grauen Nebel verringert, bis die Wände im Abstand von 180 m vollständig im Nebel verschwanden und somit die vom Betrachter entfernt liegenden Kanten nicht sichtbar waren. Der horizontale Sichtbereich der Szene betrug 180° , ausgenommen einem zentralen Bereich von 3.2° , der durch den Nebel verdeckt wurde (siehe auch Abbildung 2.3.).



Abbildung 2.3. Ansicht des Experimentalraums und der Projektionsleinwand in einer Computergraphik. Dargestellt ist ein Blick in den mit Streifenmustern texturierten Korridor. Die Versuchsteilnehmer betrachteten die Szene aus dem Mittelpunkt des Kreisbogens der Leinwand, und steuerten ihre Position im Korridor mit Hilfe einer Computermaus.

Die Wände wurden mit einem rechteckig-modulierten Schwarz-Weiß-Muster belegt, welches sich entweder alle 10 m (höhere Ortsfrequenz) oder alle 20 m (niedrigere Ortsfrequenz) wiederholte. Die schwarzen Stellen des Streifenmusters hatten eine Helligkeit von 0.2 cd/m^2 , die der weißen Stellen betrug ca. 2.0 cd/m^2 .

Eine Expansion des sichtbaren Musters in der Bildebene simulierte die Vorwärtsbewegung des Betrachters. Die Expansion war das Resultat einer Verschiebung des Musters im dreidimensionalen Modell, der eine konstante Vorwärtsgeschwindigkeit zugrunde lag. Die Vorwärtsgeschwindigkeit, die jeweils die Bewegung der linken und rechten Seitenwand simulierte, konnte sich unterscheiden. Wenn unterschiedliche Geschwindigkeiten simuliert wurden, vermittelte eine Seitenwand eine Vorwärtsgeschwindigkeit von 10 m/s und die andere eine Geschwindigkeit von 20 m/s. In zwei Versuchsblöcken wurde auch eine Vorwärtsgeschwindigkeit von 0 m/s simuliert (siehe Abschnitt „Versuchsbedingungen“). Auch in diesen Bedingungen konnten die Versuchspersonen ihre seitliche Position im Korridor kontrollieren, allerdings ohne die visuelle Erfahrung einer Vorwärtsbewegung.

Als ein weiterer Hinweisreiz über die Position im Tunnel wurden Seitenlinien an den Korridorwänden präsentiert. Eine Paar blaue Linien führten durchgehend bis zum sichtbaren Ende des Korridors und lagen 2 m unter dem Augenpunkt des Betrachters (Abbildung 2.4.). Ihr horizontaler Abstand

betrug, wie die der Tunnelwände, 10 m. Entsprechend der seitlichen Position im Korridor änderte sich die Lage und Orientierung der Seitenlinien in der Bildebene. Bei einer Position genau in der Mitte des Korridors endeten die Seitenlinien ungefähr in den äußeren unteren Ecken der Leinwand. Die Seitenlinien definierten auf diese Weise nur implizit eine Bodenebene. Auf eine explizite, sichtbare Bodenebene, die einen Teil der unteren Bildfläche eingenommen hätte, wurde verzichtet, um die Menge an visueller Bewegung durch das Streifenmuster konstant zu halten. Durch die Seitenlinien sollte nur *zusätzliche* Information zur Verfügung gestellt werden, um so den Vergleich der Fahrleistung unter Bedingungen ohne Seitenlinien zu erleichtern.

Die Neuberechnung der Position im Simulationsprogramm und die Bildwiederholung der Projektion konnte mit einer Frequenz von konstant 72 Hz durchgeführt werden.

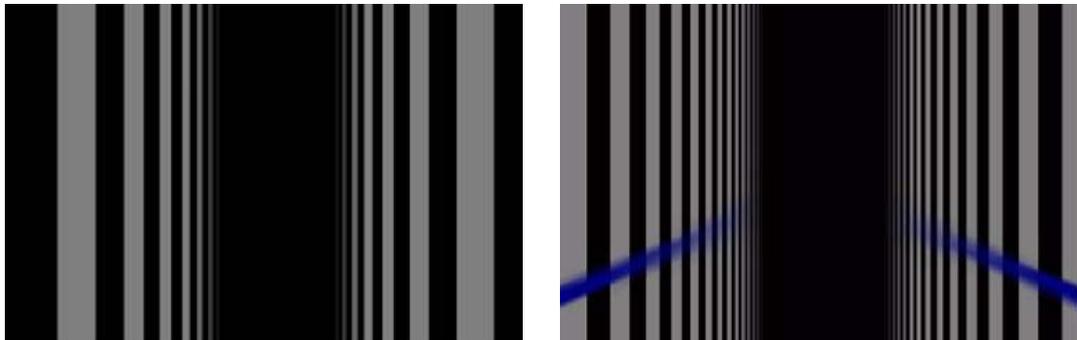


Abbildung 2.4. Blick in den Korridor mit und ohne Seitenlinien. Die Seitenlinien wurde blau dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt das Muster mit der höheren Ortsfrequenz. Ähnlich wie in dieser Abbildung, waren bei der Projektion des Korridors auf die zylindrische Leinwand keine weiteren Kanten sichtbar.

Steuerung

Die Versuchspersonen steuerten mit der Computermaus ihre laterale Position im Tunnel, in dem sie die Maus auf der Tischebene zur linken und rechten Seite bewegten. Die seitliche Auslenkung der Maus war proportional zur lateralen Geschwindigkeit. Die maximal erreichbare laterale Geschwindigkeit war 1.8 m/s. Die Seitenwände konnten jedoch nicht erreicht werden. Die seitliche Bewegung wurde 0.75 m vor den Seitenwänden gestoppt, so dass eine effektiv befahrbare Breite des Korridors von 8.5 m zur Verfügung stand.

Versuchsbedingungen

Das Experiment wurde in vier separaten Blöcken (A-D) durchgeführt (siehe auch Abbildung 2.5.). In Block A wurden jeweils gleiche Ortsfrequenzen und gleiche Geschwindigkeiten getestet (Kontrollbedingung). In Block B unterschieden sich die Geschwindigkeiten beider Wandseiten. Eine Wand-

seite simulierte im Vergleich zur gegenüberliegenden Wandseite eine doppelt so hohe Geschwindigkeit. In Block C simulierte die Bewegung der Seitenwände die gleiche Geschwindigkeit, jedoch trugen die Wände Texturen mit unterschiedlicher Ortsfrequenz. Die Wellenlänge einer Seite wurde im Vergleich zur gegenüberliegenden verdoppelt. In Block D unterschieden sich die Seiten sowohl in der Geschwindigkeit wie auch in der Ortsfrequenz des Patterns. Wurde dabei eine niedrige Ortsfrequenz mit einer hohen Geschwindigkeit gepaart und umgekehrt, wiesen beide Seiten die gleiche Kontrastfrequenz auf (siehe Abbildung 2.5. D). Wurde dagegen die hohe Ortsfrequenz mit der doppelten Geschwindigkeit bewegt, unterschieden sich die Kontrastfrequenzen um das Vierfache.

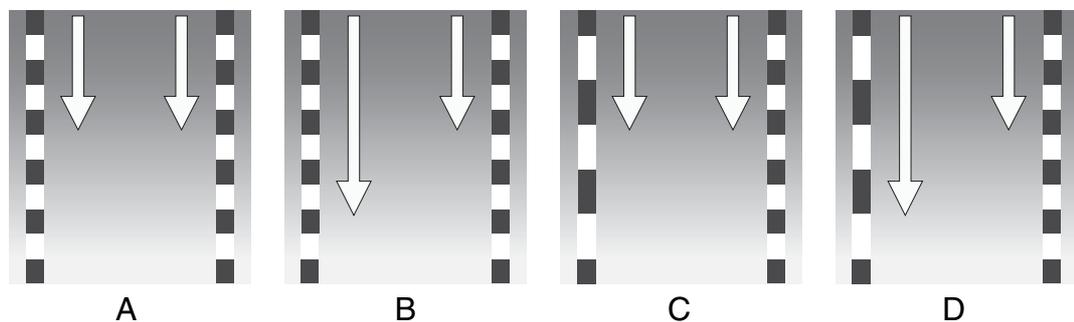


Abbildung 2.5. Schematische Darstellung der vier Versuchsblöcke A-D im „Bientunnel-Experiment“ in der Aufsicht. Pfeile symbolisieren jeweils den Geschwindigkeitsvektor der Seitenwand. A: Kontrollbedingung mit gleichen Ortsfrequenzen und gleicher Geschwindigkeit. B: Ungleiche Geschwindigkeiten. C: Ungleiche Wellenlängen des Streifenmusters. D: Ungleiche Wellenlängen und Geschwindigkeiten (in diesem Beispiel resultieren gleiche Kontrastfrequenzen auf beiden Seiten).

Jeder Durchgang hatte eine Dauer von 20 Sekunden. Block A bestand aus 48 Durchgängen, die sich aus der Kombination von drei Geschwindigkeiten (0, 10 und 20 m/s), zwei Ortsfrequenzen (Wellenlänge 10 und 20 m) und der Präsenz von Seitenlinien (präsentiert oder nicht präsentiert) ergaben. Block B bestand aus 32 Durchgängen, in denen zwei Ortsfrequenzen, zwei Seiten der größeren Geschwindigkeit (links oder rechts im Korridor) mit und ohne Seitenlinien kombiniert wurden. In Block C, bestehend aus 48 Durchgängen, wurden drei Geschwindigkeiten, zwei Seiten der höheren Ortsfrequenz (links oder rechts im Korridor) mit oder ohne Seitenlinien kombiniert. In Block D, bestehend aus 32 Durchgängen, wurden zwei Seiten der höheren Ortsfrequenz (links oder rechts) und die zwei Seiten der größeren Geschwindigkeit (links oder rechts) mit und ohne Seitenlinien kombiniert. In allen Blöcken wurde jede Kombination der Faktorstufen vier Mal wiederholt. Jede Versuchsperson absolvierte dabei eine Gesamtzahl von 160 Durchgängen.

Durchführung

Das Experiment begann mit einem Übungsabschnitt, in dem sich die Probanden an die Aufgabe und an die Maussteuerung gewöhnen sollten. Nur in dieser ersten Phase bekamen die Probanden Rückmeldung über ihre tatsächliche Position im Korridor durch eine numerische Anzeige. In der Regel wurden 8-10 Durchgänge der Bedingungen aus Block A durchgeführt.

Die Reihenfolge der vier Versuchsblöcke A-D wurde über die zwölf Versuchspersonen ausbalanciert. Von den 24 möglichen Permutationen wurde 12 Varianten ausgewählt, so dass jeder Block gleich häufig an erster, zweiter, dritter und vierter Stelle im Experiment vorkam. Dadurch sollten etwaige Reihenfolgeeffekte, wie sie z.B. durch Übungseinflüsse und Ermüdung auftreten können, ausgeglichen werden.

Jeder Durchgang wurde von den Versuchspersonen per Knopfdruck gestartet und begann mit einer seitlichen Versetzung von 2 m links oder rechts von der Korridormitte. Unmittelbar danach sollten sich die Probanden zur Mitte des Korridors bewegen, dort bis zum Ende des Durchgangs bleiben, und die Position möglichst schnell korrigieren, sobald sie eine Abweichung feststellten. Die Teilnehmer wurden darüber informiert, dass sich die Streifen auf der linken und rechten Seitenwand in der Breite unterscheiden konnten, nicht jedoch darüber, dass eine Seitenwand eine größere Geschwindigkeit als die andere haben konnte. Sie wurden ferner darauf hingewiesen, dass nur sie allein die Position kontrollieren würden, und keine anderen unvorhersagbaren Versetzungen zu erwarten wären.

Auswertung und Analyse

Die Positionsdaten aus der zweiten Hälfte eines jeden Durchgangs (10-20 s nach Durchgangsbeginn) wurden zur Analyse herangezogen. Aus Vorexperimenten war bekannt, dass das Erreichen einer stabilen zentralen Position im Tunnel nach einer anfänglichen Versetzung eine Zeit von bis zu 10 s benötigt.

Zwei abhängige Variablen waren in diesem Experiment interessant. Zum Einen wurde für jeden Durchgang der durchschnittliche seitliche Aufenthaltsort im Korridor berechnet. Dieses Maß sollte Aufschluss darüber geben, ob die experimentellen Variablen einen systematischen Effekt auf die laterale Position ausübten. Zum Anderen sollte bestimmt werden, wie gut eine bestimmte Position eingehalten werden konnte. Hierzu wurde für jeden Durchgang die Standardabweichung der lateralen Position als Genauigkeits- bzw. Variabilitätsmaß berechnet.

Zur statistischen Auswertung der Ergebnisse wurde für jeden einzelnen Block eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung gerechnet,

sowohl auf die Mittelwerts- wie auch auf die Variabilitätsdaten. Vor der varianzanalytischen Überprüfung des Variabilitätsmaßes wurde die Standardabweichung logarithmiert, da erfahrungsgemäß die Verteilungen der Standardabweichung in diesen Experimenten nicht symmetrisch sondern linkssteil vorkamen. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden in den Abbildungen zur Variabilität des Steuerverhaltens dennoch die nicht-logarithmierten Werte angegeben.

Im folgenden Ergebnisteil werden auch die Verlaufskurven über die Gesamtdauer der Durchgänge präsentiert. In diesen Abbildungen entsprechen die dargestellten Datenpunkte den Mittelwerten eines 2-Sekunden-Intervalls. Wenn Fehlerbalken in den Abbildungen gezeigt werden, entsprechen sie dem Mittelwert plus/minus einem Standardschätzfehler des Mittelwertes, wenn es nicht anders vermerkt worden ist.

Ergebnisse

Kontrollbedingung - Block A

Die Ergebnisse der mittleren lateralen Position zeigen, dass keine der experimentellen Manipulationen die Versuchspersonen systematisch in der Wahl ihrer Position beeinflusste (Abbildung 2.6.). Keiner der Faktoren stellte sich als signifikant heraus, noch gab es signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren.

Insgesamt fuhren die Teilnehmer zwar unbeeinflusst von der experimentellen Manipulation verhältnismäßig zentral im Korridor, jedoch weicht der Mittelwert aller Durchgänge vom genauen Mittelpunkt im Korridor ab. Die Teilnehmer positionierten sich insgesamt etwas links von der Mitte (Abweichung von -0.32 m ; $p < 0.001$). Dies ist ein Befund, der, um Ergebnisse vorwegzunehmen, in fast allen Blöcken vorzufinden war. Es wird vermutet, dass dieses Verhalten damit zusammenhängt, dass im realen Verkehr der Kopf des Fahrers tatsächlich ca. 30-40 cm links von der Fahrbahnmitte liegt, wenn das Fahrzeug in der Mitte einer Straße gesteuert wird. Dieser Befund könnte dann daher resultieren, dass die Versuchspersonen im Experiment nicht ihre Körpermitte, sondern eine virtuelle Fahrzeugmitte zentrierten. Dass insgesamt zu weit links gefahren wurde, stört jedoch die Interpretation der Daten nicht, und auf diesen Befund wird nicht mehr gesondert eingegangen. Stattdessen interessierte hier die relative Versetzung von diesem Gesamtmittelwert durch die verschiedenen Versuchsbedingungen, und beobachtete Versetzungen sind dementsprechend auch relativ dazu aufgetragen.

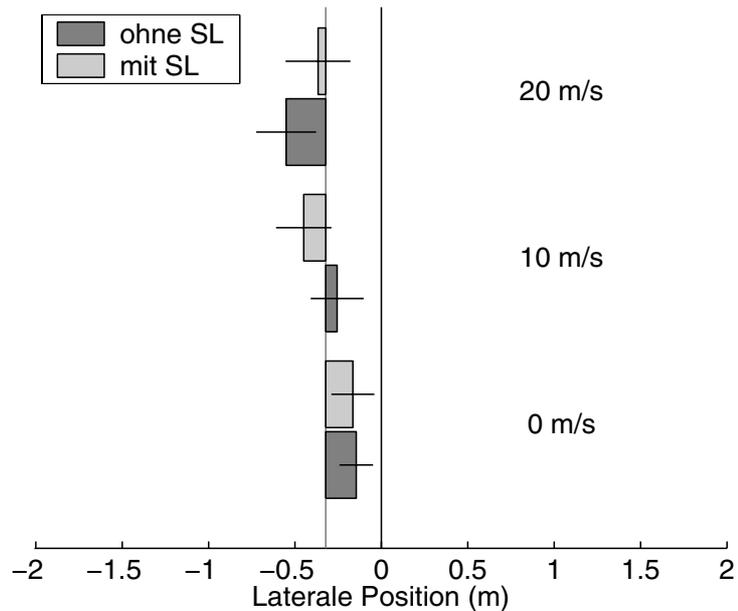


Abbildung 2.6. Laterale Position in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Präsenz von Seitenlinien (SL) in der Kontrollbedingung mit jeweils gleichen Ortsfrequenzen und gleicher Geschwindigkeit der Seitenwände. Die laterale Position ist vom Gesamtmittelwert aller Durchgänge aus aufgetragen (graue Linie bei -0.32 m).

Betrachtet man die Standardabweichung als Maß für die Genauigkeit, mit der eine zentrale Position eingehalten werden konnte, zeigen sich einige systematische Effekte unter den verschiedenen Bedingungen in diesem Block. Die Varianzanalyse zeigte einen Effekt der Seitenlinien, $F(1,11) = 10.19$, $p = 0.009$, der Geschwindigkeit, $F(2,22) = 138.20$, $p < 0.001$, und eine Interaktion zwischen Seitenlinien und Geschwindigkeit, $F(2,22) = 8.85$, $p = 0.002$. Der Faktor Ortsfrequenz dagegen war nicht signifikant. Eine graphische Darstellung dieser Ergebnisse ist in Abbildung 2.7. zu sehen.

In den Durchfahrten ohne simulierte Vorwärtsgeschwindigkeit gab es keine Unterschiede innerhalb keinem der Faktoren ($p > 0.05$). Im Fall ohne Vorwärtsgeschwindigkeit war auch die kleinste Standardabweichung zu beobachten: Das Zentrieren im Korridor gelang hier am besten. Wurde die Geschwindigkeit erhöht, erhöhte sich auch die Streuung in den Positionsdaten (Haupteffekt Geschwindigkeit). Diese größere Variabilität wurde zu einem Teil vermindert, wenn zusätzlich Seitenlinien die Position im Korridor markierten (Haupteffekt Seitenlinien und Interaktion). Hier soll hervorgehoben werden, dass sich ein Effekt der Geschwindigkeit auch dann zeigte, wenn Seitenlinien die Begrenzung des Tunnels angaben. Diesen Effekt hätte man nicht erwartet, wenn die Kontrolle ausschließlich anhand der Seitenlinien erfolgt wäre, da die visuelle Information, die von den Seitenlinien stammt, sich mit größerer Geschwindigkeit nicht ändert.

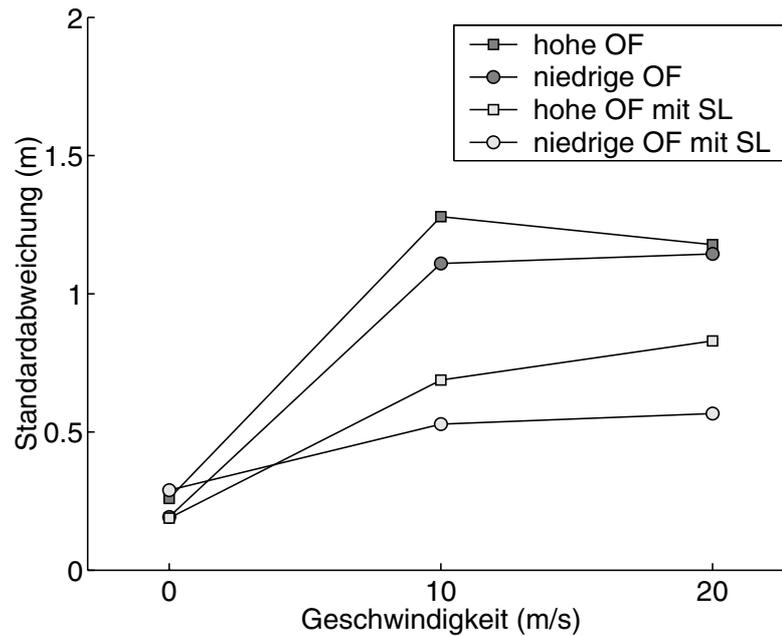


Abbildung 2.7. Effekte in der Variabilität der Steuerung in der Kontrollbedingung (Block A). Die Genauigkeit nimmt ab, wenn die Geschwindigkeit zunimmt. Bei Geschwindigkeiten von 10 und 20 m/s führt die Präsenz von Seitenlinien (SL) zu genauerer Spurhaltung, während verschiedene Ortsfrequenzen (OF) keinen Einfluss auf die Genauigkeit zu haben scheinen.

Ungleiche Seitengeschwindigkeiten - Block B

Die mögliche Nutzung der Geschwindigkeitsinformation für die Steuerung wurde durch ungleiche Wandgeschwindigkeiten in Block B untersucht, dessen Ergebnisse hier dargestellt werden. Der einzige signifikant Effekt auf die mittlere laterale Position ergab sich durch den Faktor Seite der höheren Geschwindigkeit, $F(1,11) = 7.53$, $p = 0.019$. Die Mittelwerte zeigen, dass grundsätzlich eine Position eingenommen wurde, die näher zur Seite mit der langsameren Wandgeschwindigkeit lag (siehe Abbildung 2.8.a). Wie aus der Abbildung 2.8. zu entnehmen ist, wurde diese Abweichung bei Präsenz von Seitenlinien zwar nominal kleiner, doch dies wurde nicht durch eine Interaktion (Seite der höheren Geschwindigkeit mit Seitenlinien) statistisch bestätigt¹. Ein vollständiger Abgleich der Geschwindigkeiten beider Wandseiten wäre bei einer Abweichung von 1.67 m erreicht worden, also der Position, bei der die Verhältnisse von Geschwindigkeit und Abstand zu den beiden Seiten sich entsprechen (= Punkt des Geschwindigkeitsabgleichs, PGA). Die hier gemessene laterale Position erreichte diesen PGA nicht. In den Bedingungen ohne Seitenlinien beträgt die *durschnittlichen Abweichung* 0.58 m und entspricht 34.8% der theoretisch vorhergesagten lateralen Verän-

1) Eine Varianzanalyse, in der nur die Durchgänge mit den Seitenlinien berücksichtigt wurden, zeigt ebenfalls den Effekt der unterschiedlichen Seitengeschwindigkeiten, $F(1,11) = 7.18$, $p = 0.021$.

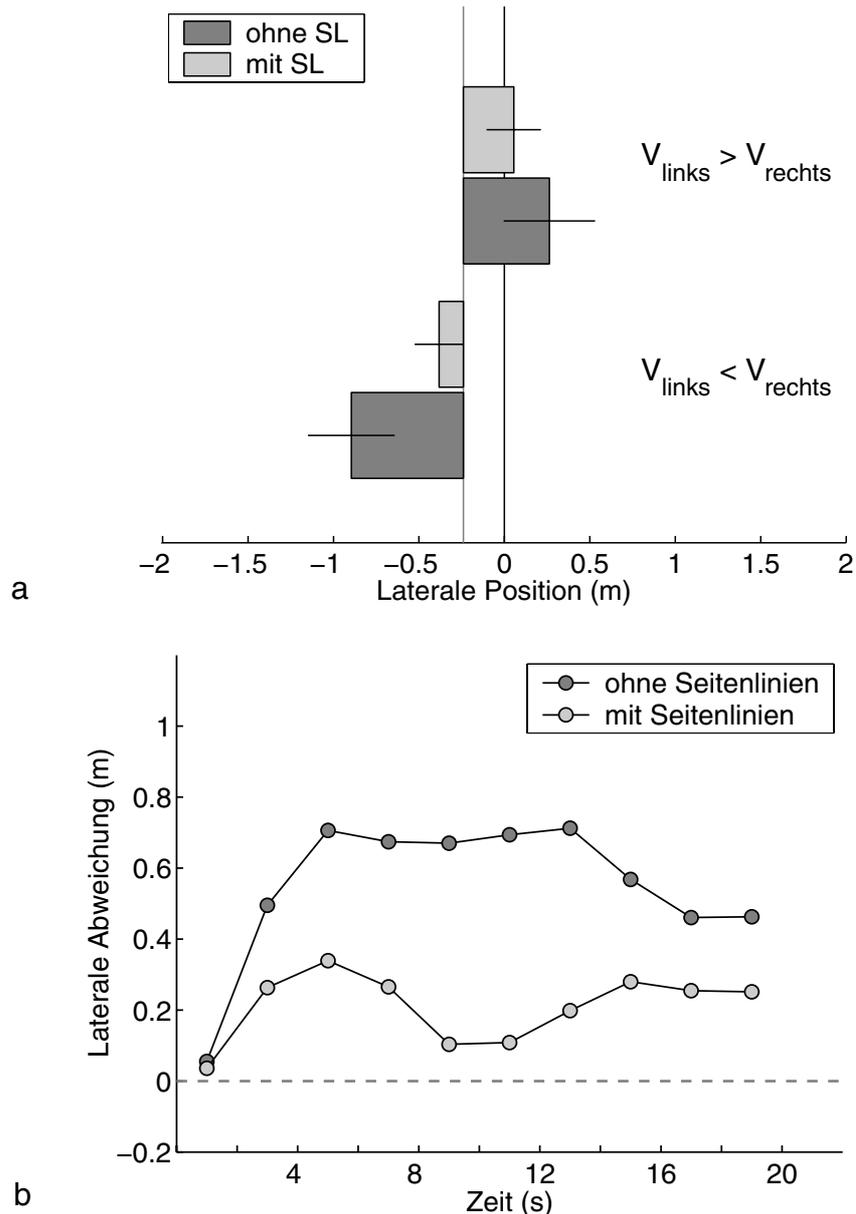


Abbildung 2.8. Mittelwerte und Verlauf in der Versuchsbedingung ungleicher Wandgeschwindigkeiten. a: Abweichung vom Gesamtmittelwert (graue, gestrichelte Linie) in der zweiten Hälfte jedes Durchgangs. Eine deutliche Abweichung in Richtung der Seite mit der langsameren Wandgeschwindigkeit ist zu erkennen. b: Verlauf der Abweichung in Richtung der langsameren Wandseite über die Zeit. Der Effekt einer ungleichen Wandgeschwindigkeit ist sowohl mit wie auch ohne Seitenlinien bereits 2-4 s nach Beginn des Durchgangs zu sehen.

derung. Man kann die gemessene Abweichung auch danach beurteilen, wieviel Prozent des Geschwindigkeitsabgleichs dadurch erreicht worden ist. Gegeben ein Geschwindigkeitsverhältnis der Seitenwände von zwei, wurde mit dieser lateralen Abweichung eine Angleichung der Geschwindigkeit zu 41.5% erreicht. Dabei entsprechen 0% einer unveränderten Position in der Mitte des Korridors und 100% einem vollständigen Abgleich bei 1.67 m late-

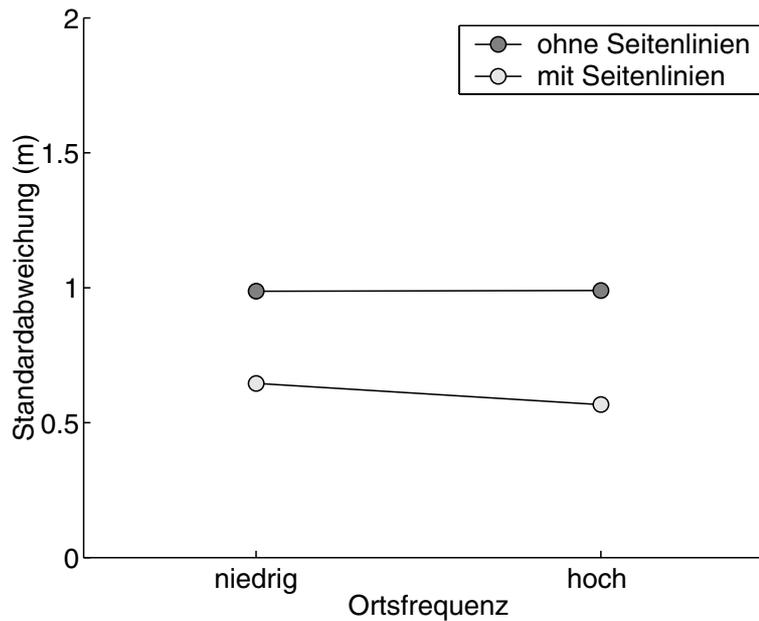


Abbildung 2.9. Effekt der Präsenz der Seitenlinien auf die Variabilität der Steuerung bei ungleichen Wandgeschwindigkeiten.

ralen Abstand von der Mitte (siehe hierzu auch Anhang 2). Bei Präsenz von Seitenlinien beträgt die Abweichung sogar nur 0.22 m, also 13.1% von der Positionsänderung (16.8% vom Geschwindigkeitsverhältnis), die man erwarten würde, wenn die Geschwindigkeiten vollständig ausgeglichen worden wären.

Betrachtet man den Verlauf der Abweichung von der Korridormitte über den gesamten Zeitraum eines Durchgangs, zeigt sich der Beginn der Positionsveränderung bereits nach zwei Sekunden (Abbildung 2.8.b). Ohne Seitenlinien wurde eine größere maximale laterale Abweichung erreicht. Die Verlaufsform beider Zeitreihen liefert keinen Hinweis auf eine differenzielle Wirkung des Faktors Seitenlinien über die Zeit. Hätten die Fahrer die Geschwindigkeitsinformation und die Seitenlinieninformation zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Durchgang genutzt, hätte man in den Bedingungen mit Seitenlinien entweder ein frühe Abweichung sehen müssen (die später korrigiert worden wäre), oder eine Abweichung, die insgesamt erst später aufgetreten wäre.

In den Variabilitätsdaten zeigte sich als einziger Effekt der Haupteffekt des Faktors Seitenlinien, $F(1,11) = 11.90$, $p = 0.005$. Die beobachtete Standardabweichung wurde mit der Verfügbarkeit von Seitenlinien stark reduziert (Abbildung 2.9.). Vergleichbar zu den Befunden in der Kontrollbedingung scheinen die Seitenlinien die Kontrolle der lateralen Position vereinfacht zu haben.

Ungleiche Ortsfrequenzen - Block C

In den Verhaltensexperimenten mit Bienen konnte gezeigt, dass der Flugweg durch unterschiedliche Ortsfrequenzen an den Korridorseiten nicht beeinflusst wird (Srinivasan et al., 1991). Dies war ein wichtiges Teilergebnis, um die Frage, ob das Bienenverhalten nun von der Geschwindigkeit des Wandmusters oder dessen Kontrastfrequenz gesteuert wird, zu Gunsten der Geschwindigkeit zu entscheiden. Die Analyse der Daten aus Block C lieferte jedoch für die hier getesteten Personen ein anderes Ergebnis.

Wurde die Ortsfrequenz auf einer Seite erhöht, so stellten sich die Fahrer an eine Stelle im Korridor, die näher zu dieser Seite lag, wenn keine Seitenlinien vorhanden waren. Wie in Abbildung 2.10. (dunkle Markierungen) zu sehen ist, fand diese Hinwendung bei allen untersuchten Geschwindigkeiten statt. Die Korrektur in Richtung der höheren Ortsfrequenz fing unmittelbar nach Durchgangsbeginn an und war für 6-8 Sekunden zu beobachten. Mit Seitenlinien dagegen (Abbildung 2.10., helle Markierungen), war die Abweichung von der Mitte des Korridors deutlich reduziert.

Die varianzanalytische Auswertung der Positionsdaten aus der zweiten Hälfte jedes Durchgangs bestätigte den Effekt des Faktors Richtung der höheren Ortsfrequenz, $F(1,11) = 26.29$, $p < 0.001$, und zeigte eine signifikante Interaktion zwischen der Richtung der höheren Ortsfrequenz und Seitenlinien, $F(1,11) = 16.49$, $p = 0.002$. Die signifikante Interaktion sichert den Befund, dass mit Seitenlinien die Abweichung stark vermindert wurde. In Abbildung 2.11. sind die Mittelwerte dieser Faktorstufenkombinationen dargestellt. Zwar kann man allen graphischen Darstellungen eine kleine Abweichung von der Korridormitte auch bei Präsenz von Seitenlinien entnehmen, statistisch wurde diese Differenz jedoch bei einem Signifikanzniveau von 5% nicht gesichert. Der Betrag der Abweichung mit 0.19 m war auch verhältnismäßig klein, kleiner als in der vergleichbaren Bedingung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die weiteren Faktoren und Interaktionen zwischen den Faktoren waren nicht signifikant.

Analog zum Abgleich unterschiedlicher Geschwindigkeiten kann durch die Veränderung der lateralen Position auch eine Angleichung des Erscheinungsbildes beider Wandseiten angestrebt werden: Da sich die Muster beider Seiten in ihrer Wellenlänge unterschieden, erschienen hinsichtlich ihrer Exzentrizität korrespondierende Streifen des Musters unterschiedlich breit, wenn sich die Fahrer in der Korridormitte befanden. Genauer gesagt, erscheint das Streifenmuster auf der Seite mit der niedrigeren Ortsfrequenz, wenn der Fahrer im Korridor zentriert ist, doppelt so breit. Unter der Annahme, dass beide Seiten gleich texturiert seien, kann eine gleiche Streifenbreite auf beiden Seiten angestrebt werden, in dem zur Seite mit der

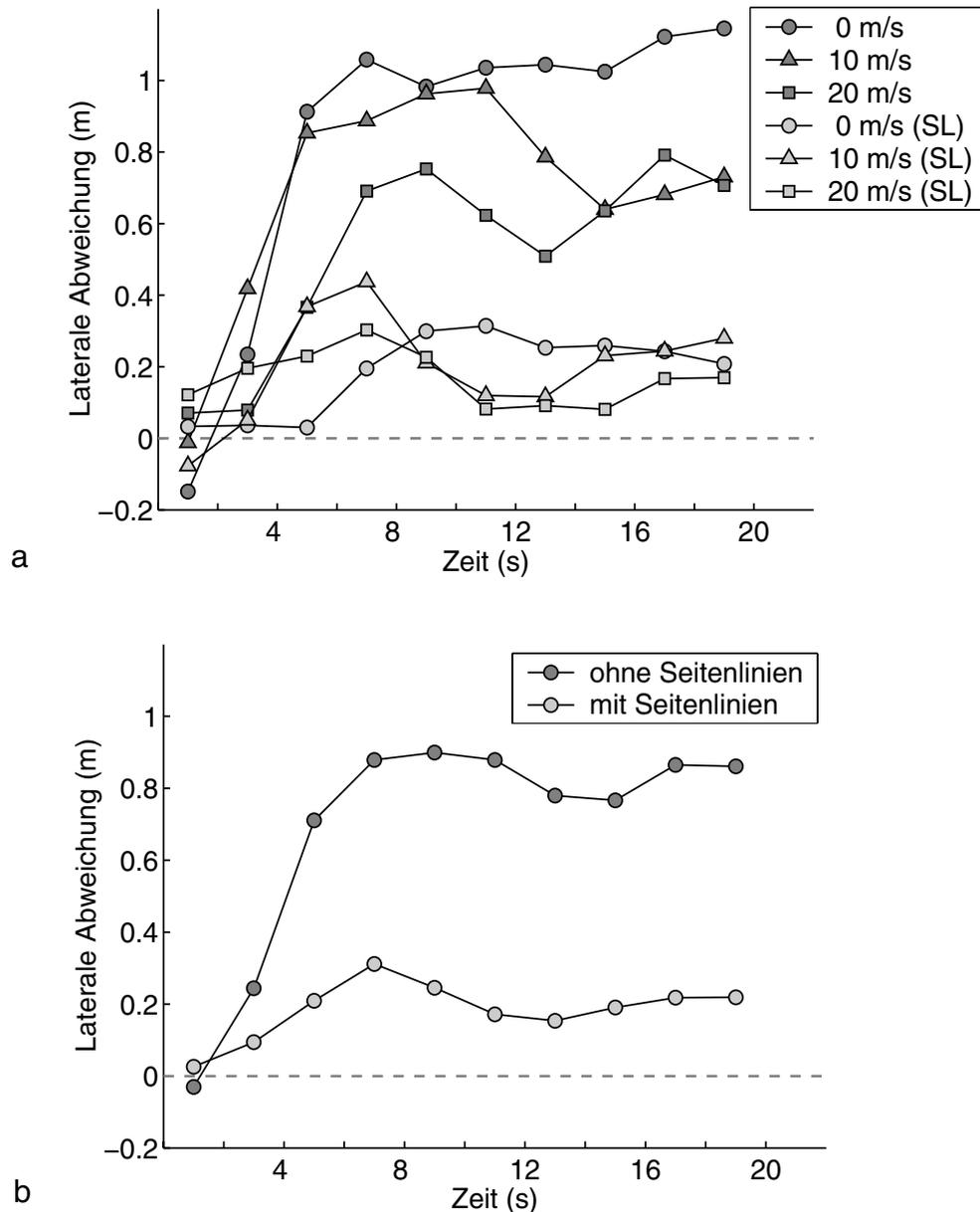


Abbildung 2.10. Verlauf der lateralen Abweichung bei ungleichen Ortsfrequenzen. Die Abweichungen sind hier als mittlere Differenz der lateralen Position innerhalb eines 2-Sekunden-Intervalls abzüglich den individuellen Mittelwerten jeder Versuchsperson berechnet worden. Positive Abweichungen weisen in Richtung der höheren Ortsfrequenz. In (a) ist der Verlauf nach den drei Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt, und in (b) sind die gleichen Daten zur Verdeutlichung über die Geschwindigkeit gemittelt.

höheren Ortsfrequenz steuert wird. Beide Seiten würden bei einem Abstand von 1.67 m von der Mitte zur Seite mit der höheren Ortsfrequenz dann „gleich dicht“ gestreift aussehen. Analog zum Geschwindigkeitsabgleich, ist dies die Position, bei der sich die Verhältnisse von Wellenlänge und Abstand beider Seiten entsprechen (= Punkt des Ortsfrequenzabgleichs, POA).

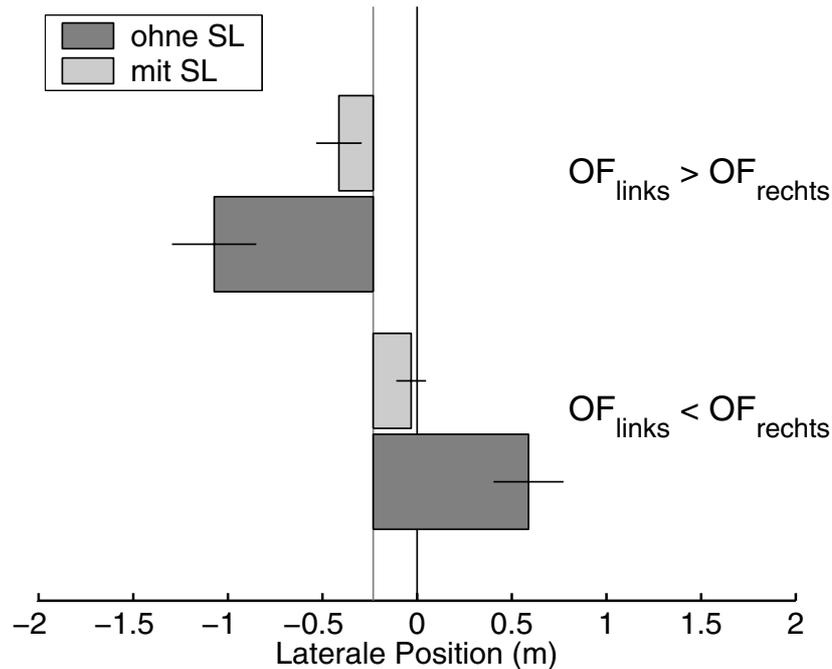


Abbildung 2.11. Mittlere laterale Position bei ungleichen Ortsfrequenzen (OF) während der zweiten Hälfte der Durchgänge (10-20 s), in Abhängigkeit davon, auf welcher Korridorseite die höhere Ortsfrequenz präsentiert wurde. Balken sind auf den Mittelwert der Gesamtheit aller Durchgänge justiert (graue Linie). Ohne Information über die Seitenlinien, positionieren sich die Fahrer jeweils näher zur Seitenwand mit der höheren Ortsfrequenz (dunkle Balken). Dieser Effekt wird stark verringert, wenn zusätzlich Seitenlinien vorhanden sind (helle Balken). Die zwei Bedingungen mit Seitenlinien unterscheiden sich statistisch nicht voneinander ($p > 0.05$).

In den Bedingungen ohne Seitenlinien zeigte sich eine durchschnittliche Abweichung von der Korridormitte von 0.83 m, und diese entspricht 49.8% der theoretischen lateralen Abweichung zum Punkt des Ortsfrequenzabgleichs, bzw. 57.0% der Abgleichs der Streifenbreite (siehe hierzu auch Anhang 2). Wie auch hier deutlich zu erkennen ist, wurde eine vollständige Angleichung der Ortsfrequenzen im Mittel nicht angestrebt bzw. nicht erreicht.

Aus der Analyse der Variabilitätsdaten geht hervor, dass mit steigender Geschwindigkeit die Standardabweichung zunimmt, $F(2,22) = 93.76$, $p < 0.001$. Dies ist der Fall, unabhängig davon, ob Seitenlinien den Fahrbereich zusätzlich angeben oder nicht (siehe Abbildung 2.12.). Auch hat der Faktor Seitenlinien, wie in allen bisher vorgestellten Bedingungen, einen Einfluss auf die Variabilität der Steuerung, so dass die Standardabweichung mit Seitenlinien insgesamt kleiner ist, $F(1,11) = 29.66$, $p < 0.001$. Dagegen lässt sich keine Interaktion zwischen den Faktoren aufzeigen.

Die Höhe der Steuerungsvariabilität in der Bedingung ohne Vorwärtsgeschwindigkeit entspricht der Variabilität in der Kontrollbedingung (vgl.

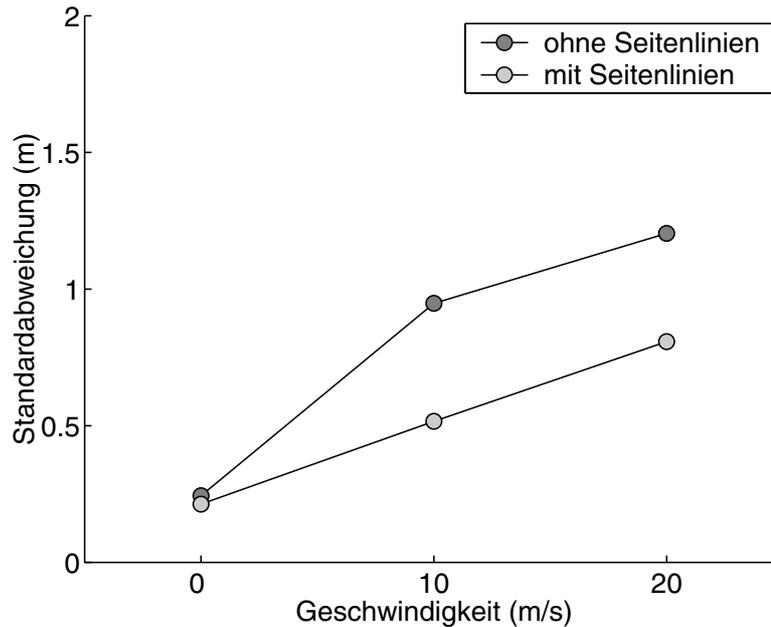


Abbildung 2.12. Effekte auf die Variabilität des Steuerungsverhaltens als Funktion der Geschwindigkeit und der Verfügbarkeit von Seitenlinien. Die Genauigkeit der Kontrolle nimmt zu, wenn (a) Seitenlinien den Fahrbereich kennzeichnen, und (b) die Fahrgeschwindigkeit abnimmt. Die Interaktion zwischen Geschwindigkeit und Seitenlinien ist nicht signifikant ($p > 0.05$).

Abbildung 2.7.), und bestätigt den Befund, dass die kleinste Varianz in den Positionsdaten dann zu finden ist, wenn keine Vorwärtsgeschwindigkeit vorliegt. Interessanterweise ist dabei die Variabilität ohne Seitenlinien auch nicht höher wie mit Seitenlinien, trotz der stark unterschiedlichen lateralen Position im Korridor.

Die Bedeutung dieses Befundes lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Wenn durch unterschiedliche Ortsfrequenzen eine laterale Abweichung von der Mitte provoziert wird, wird die anschließend eingenommene Position so stabil gehalten, wie sie auch durch beidseitig gleiche Ortsfrequenzen oder durch Seitenlinien ermöglicht wird.

Unterschiedliche Ortsfrequenzen und Geschwindigkeiten - Block D

In der vorherigen zwei Ergebnisblöcken wurden Resultate aus Bedingungen vorgestellt, in denen entweder nur die Ortsfrequenz oder nur die Wandgeschwindigkeit manipuliert wurde. Hier werden Ergebnisse vorgestellt, wenn gleichzeitig Ortsfrequenz und Geschwindigkeit der Seitenwand geändert wurden. Dabei entstanden Paarungen von Ortsfrequenz und Geschwindigkeit, die entweder in einer gleichen Kontrastfrequenz resultierten oder in Bedingungen, in denen sich die Kontrastfrequenzen beider Korridorseiten um das Vierfache unterschieden.

Drei Faktoren wurden in diesem Block untersucht. Die Richtung der höheren Geschwindigkeit (links oder rechts), die Richtung der höheren Ortsfrequenz (links oder rechts) und die Sichtbarkeit von Seitenlinien (mit oder ohne). Die Varianzanalyse zeigte einen signifikanten Effekt der Richtung der höheren Geschwindigkeit, $F(1,11) = 15.57$, $p = 0.002$, einen Effekt der Richtung der höheren Ortsfrequenz, $F(1,11) = 5.34$, $p = 0.041$, und eine Interaktion zwischen Seitenlinien und Richtung der höheren Geschwindigkeit, $F(1,11) = 9.75$, $p = 0.010$. Die signifikanten Effekte und weitere nicht signifikante Mittelwerte sind in Abbildung 2.13. zusammengestellt. In Abbildung 2.14. sind die Ergebnisse getrennt nach dem Vorhandensein von Seitenlinien aufgetragen. Die größte laterale Abweichung findet sich in der Bedingung ohne Seitenlinien, wenn auf der einen Seite die höhere Ortsfrequenz mit der niedrigeren Geschwindigkeit und auf der gegenüberliegenden Seite die niedrigere Frequenz mit höherer Geschwindigkeit bewegt wird. In diesem Fall steuerten die Fahrer im Durchschnitt 0.84 m zur Seite mit der höheren Ortsfrequenz (siehe Abbildung 2.14.a, mittlere 2 Balken). Dieses Ergebnis ist insofern konsistent mit den Ergebnissen aus Block B und C, da es zeigt, dass die Positionsveränderung sowohl zur höheren Ortsfrequenz wie auch zur niedrigeren Wandgeschwindigkeit gerichtet war. Dabei ist die Größe der Abweichung vergleichbar mit derjenigen, welche in der Bedingung mit ungleichen Ortsfrequenzen gemessen wurde, und nicht, wie man vielleicht auch erwarten könnte, deutlich größer. Wurde dagegen ein hohe Ortsfrequenz mit einer hohen Geschwindigkeit bewegt, wichen die durchschnittlichen Positionen während der zweiten Hälfte jedes Durchgangs nicht systematisch vom durchschnittlichen Aufenthaltsort aller Durchgänge ab (Abbildung 2.14.a, oberer und unterer Balken). Hier scheinen sich die gegenläufigen Tendenzen aufgehoben zu haben.

Die Bedingungen mit Seitenlinien zeigen ein bereits bekanntes Bild. Insgesamt traten hier wieder kleinere Abweichungen auf als in den Bedingungen, die keine Seitenlinien enthielten (Abbildung 2.14.b). Die Varianzanalyse der Positionsdaten zeigte keinen Effekt des Faktors Seitenlinien. Das überrascht allerdings nicht, da über die anderen Faktoren im Mittel keine systematischen Abweichungen erwartet wurden: Die übrigen Faktoren kodierten nur die Seite, auf der die höherwertige Ausprägung lag, und es gab keine Hinweise auf eine Links-Rechts-Asymmetrie. Allerdings zeigte sich eine signifikante Interaktion des Faktors Seitenlinien mit dem Faktor Geschwindigkeit (Abbildung 2.13.c), die daher rührte, dass die Abweichung bei Präsenz von Seitenlinien stark vermindert wurde. Eine ebenfalls erwartete Wechselwirkung zwischen dem Faktor Seitenlinien und der Richtung der höheren Ortsfrequenz erreichte allerdings keine statistische Signifikanz ($p > 0.05$; Abbildung 2.13.f). Mit anderen Worten heißt das, dass sowohl mit wie auch

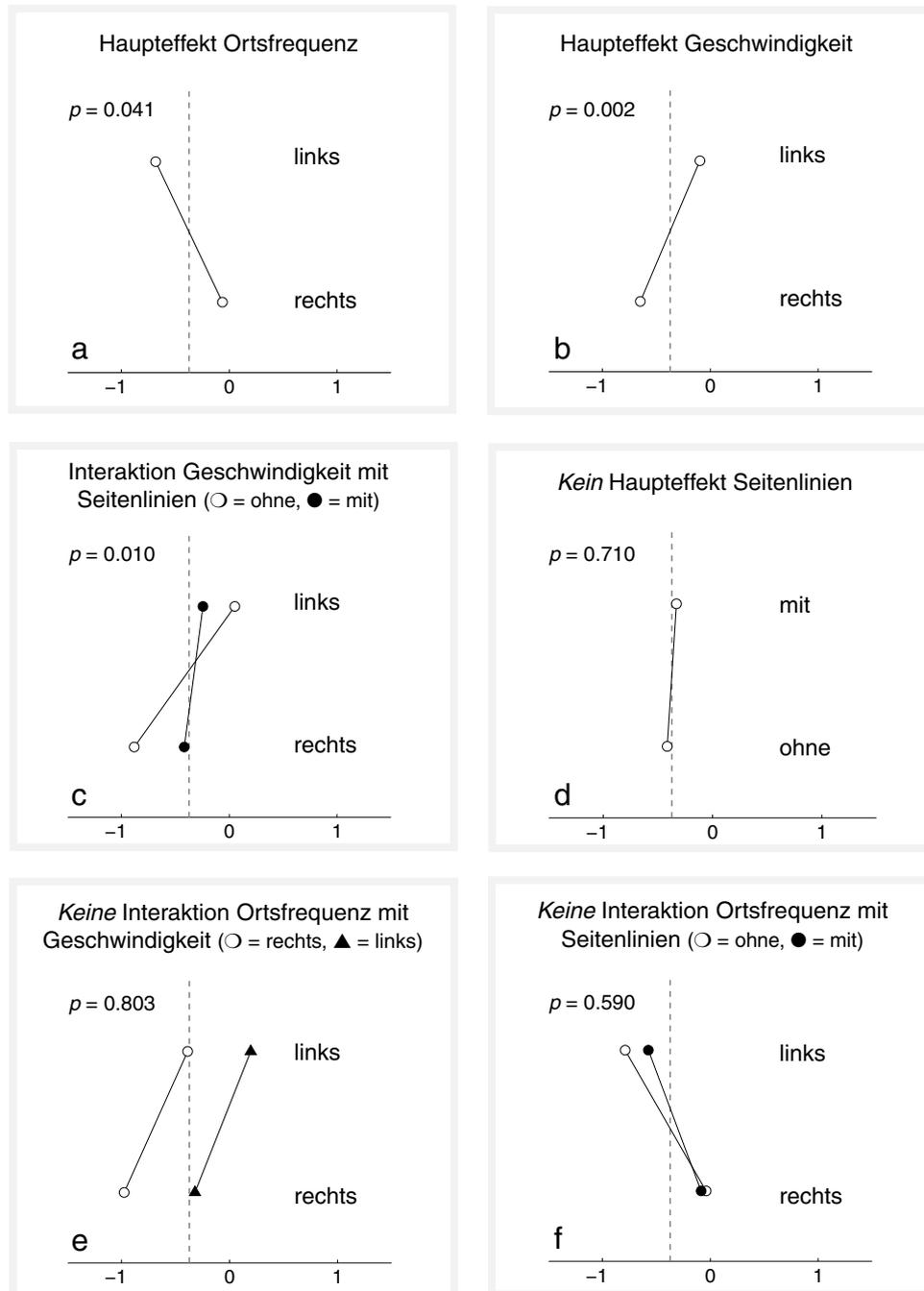


Abbildung 2.13. Unterschiedliche Ortsfrequenzen und Geschwindigkeiten: Haupteffekte und Interaktionen der lateralen Position während des zweiten Hälfte jedes Durchgangs im Überblick. Die Abszisse gibt die laterale Position an. Die zwei Ausprägungen des (erstgenannten) Faktors sind durch eine Linie verbunden, wobei die Ordinatebezeichnung „links“ bedeutet, dass die höherwertige Ausprägung des Faktors auf der linken Seite vorliegt. Weitere Symbole trennen ggf. die zwei Faktorstufen des zweitgenannten Faktors. Die p-Werte geben die Irrtumswahrscheinlichkeit für den jeweiligen Effekt an. Die gestrichelte graue Linie entspricht dem Mittelwert über alle Durchgänge (-0.372 m). Man beachte insbesondere die Unabhängigkeit von Ortsfrequenz- und Geschwindigkeitsinformation (e), und die quantitativ vergleichbaren Effekte der Ortsfrequenz mit und ohne Seitenlinieninformation (f).

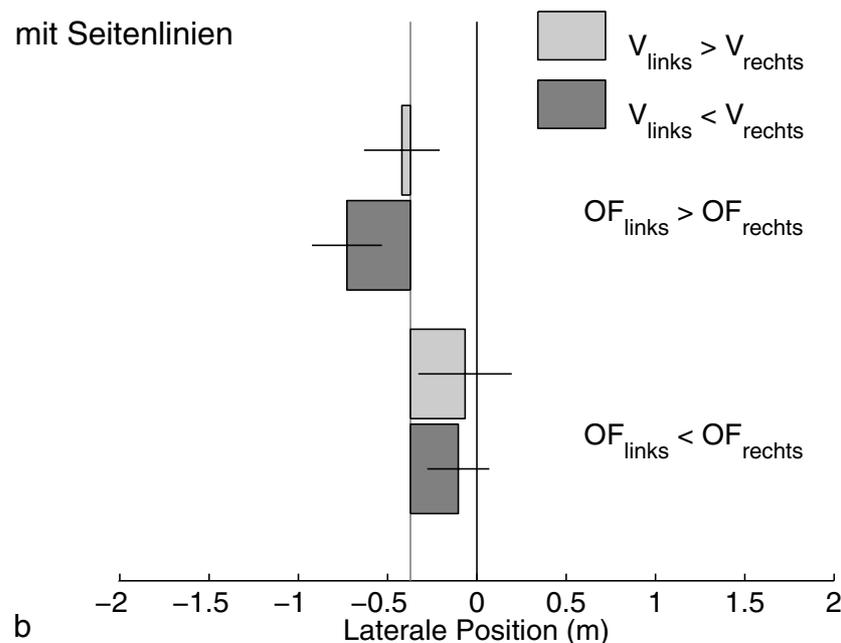
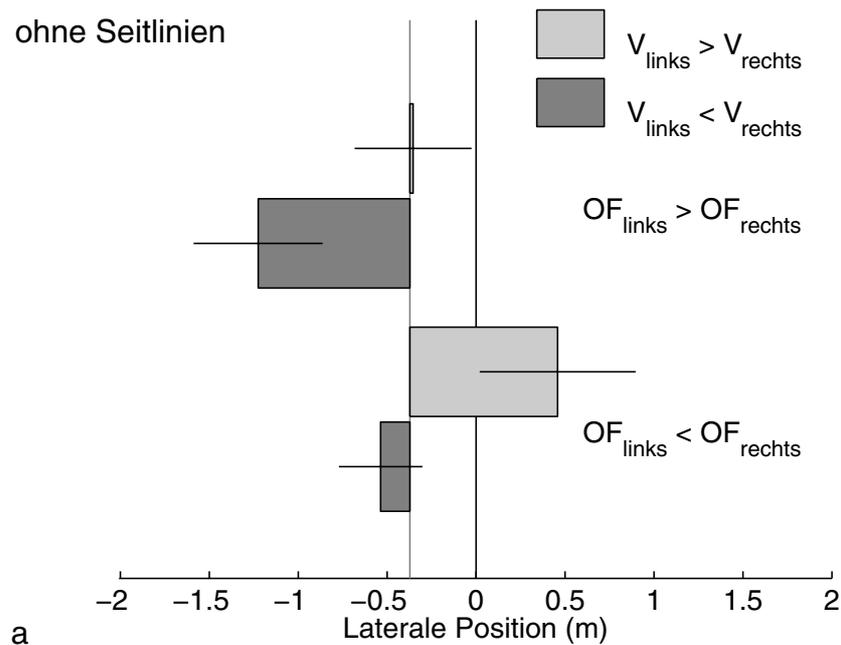


Abbildung 2.14. Mittlere laterale Position, wenn sich jeweils die Ortsfrequenz (OF) und die Geschwindigkeit beider Wandseiten (V) unterscheiden. a: Ergebnisse ohne Seitenlinien. b: Ergebnisse mit Seitenlinien. Die jeweiligen Paarungen einer Ortsfrequenz mit einer Vorwärtsgeschwindigkeit resultierten in entweder einer gleichen Kontrastfrequenz (1 Hz) oder einer Kontrastfrequenz, die sich zwischen den Wandseiten um das Vierfache unterschied (0.5 und 2 Hz). Die zwei mittleren Balken in jeder Teilabbildung stellen Bedingungen mit gleicher Kontrastfrequenz dar.

ohne Seitenlinieninformation vergleichbare laterale Abweichungen aufgrund der unterschiedlichen Ortsfrequenzen der Seitenwände entstanden.

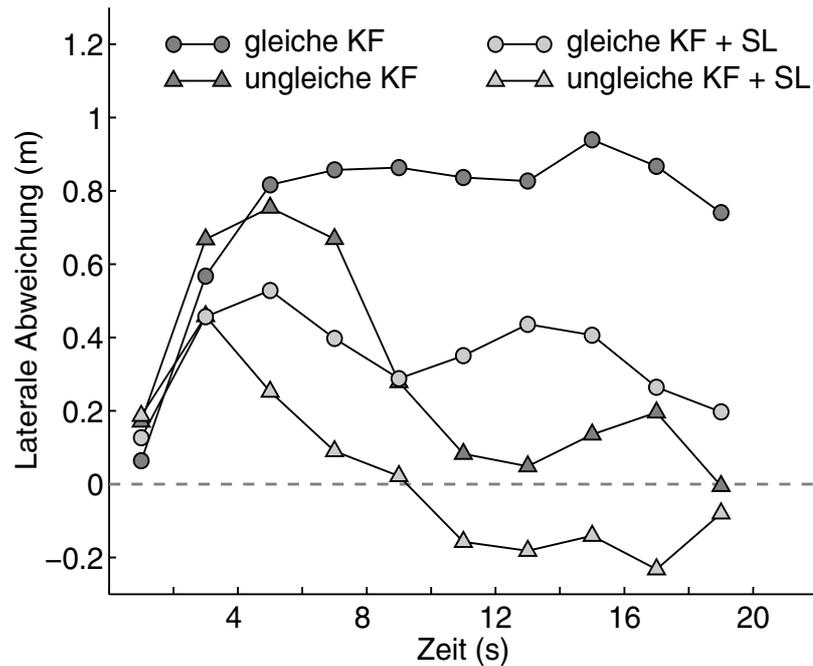


Abbildung 2.15. Laterale Abweichung über die Zeit nach Kontrastfrequenz (KF) und Verfügbarkeit von Seitenlinien (SL) getrennt. Positive Abweichung führen zur Seite mit der niedrigeren Wandgeschwindigkeit. Gleiche KF herrscht in jenen Bedingungen, in denen die höhere Ortsfrequenz mit der niedrigen Geschwindigkeit und umgekehrt gepaart wird. Bei ungleicher KF wird die höhere Ortsfrequenz mit der höheren Geschwindigkeit kombiniert, und die KF_n beider Seiten unterscheiden sich hier um das Vierfache. Bei ungleicher KF heben sich die Tendenzen, einerseits in Richtung der höheren Ortsfrequenz und andererseits in Richtung der niedrigeren Geschwindigkeit zu fahren, nahezu auf - jedoch erst in der zweiten Hälfte der Durchgänge. In den ersten Sekunden werden bei ungleicher und gleicher KF ähnliche Abweichungen beobachtet, d.h. die Geschwindigkeitsinformation wird anfänglich gleich stark verwendet und im weiteren Verlauf des Durchgangs wird die Ortsfrequenzinformation zunehmend stärker bewertet.

Wie weiter oben bereits erwähnt, glich der Effekt einer höheren Wandgeschwindigkeit den Effekt einer höheren Ortsfrequenz aus. Diese Aussage stimmt jedoch nur, wenn man die individuellen Mittelwerte aus dem zweiten Intervall der Durchgänge berechnet. Der zeitliche Verlauf dagegen zeigt, dass diese Aufhebung der zwei gegensätzlichen Tendenzen nicht von Anfang an geschah. Abbildung 2.15. stellt den Zeitverlauf des Abweichungsbetrags dar, getrennt nach der Paarung von Ortsfrequenz und Geschwindigkeit, also nach der resultierenden Kontrastfrequenz. Betrachtet man den Zeitverlauf ohne Seitenlinien (dunkle Markierungen in Abbildung 2.15.), sieht man bei gleichen Kontrastfrequenzen (Paarung der höheren Ortsfrequenz mit der niedrigeren Geschwindigkeit), dass die Abweichung von der Mitte unmittelbar nach Durchgangsbeginn zunahm, nach wenigen Sekunden (4-6 s) ein Plateau erreichte, und sich bis zum Durchgangsende nur wenig veränderte. Über den Zeitbereich von 10 bis 20 Sekunden lag dann, eine mittlere Abweichung von 0.84 m vor. Eine ähnlich starke Abwei-

chung von der Korridormitte konnte man in den ersten Sekunden auch im Fall ungleicher Kontrastfrequenzen beobachten (Paarung der höheren Ortsfrequenz mit der höheren Geschwindigkeit). Nachdem jedoch eine vergleichbare maximale Abweichung erreicht wurde, korrigierten die Fahrer ihre Position wieder zur Korridormitte hin. Dies deutet darauf hin, dass die anfängliche Abweichung von den unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten verursacht wurde und anschließend die Ortsfrequenzinformation stärker gewichtet wurde. Auch die Daten aus den Seitenlinienbedingungen stimmen mit dieser Interpretation gut überein. Mit Seitenlinien konnte man eine kleinere Abweichung von der Korridormitte beobachten. Aber selbst hier wurde sowohl stärker als auch früher korrigiert, wenn die Frequenz des Streifenmuster und die Vorwärtsgeschwindigkeit unterschiedliche Kontrastfrequenz bildeten.

Diese Ergebnisse legen nahe, dass Fahrer das Verhältnis der Wandgeschwindigkeiten und das Verhältnis der Ortsfrequenzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nutzen. Die ersten Korrekturen richten sich nach der Wandgeschwindigkeit und erst in einer späteren Phase gewinnt die Ortsfrequenzinformation zunehmend an Bedeutung.

Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Experiment wurden drei visuelle Informationsquellen manipuliert, die es dem Fahrer prinzipiell ermöglichen sollten, seine Position innerhalb eines Korridors erfolgreich zu kontrollieren. Das Hauptaugenmerk des Experimentes richtete sich dabei auf die potenzielle Verwendung der Geschwindigkeitsinformation und dem Vergleich dieses Hinweisreizes mit Lageinformation, die von Seitenlinien herrührt. Eher als Kontrollvariable wurde die Ortsfrequenz des Wandmusters manipuliert, da sich Geschwindigkeit, Ortsfrequenz und Kontrastfrequenz eines bewegten Muster wechselseitig determinieren. Eine etwaige Reaktion auf unterschiedliche Wandgeschwindigkeiten hätte danach nicht zweifelsfrei auf Geschwindigkeitsunterschiede zurück geführt werden können, da damit auch Unterschiede in der Kontrastfrequenz einher gehen (Egelhaaf & Borst, 1992; Srinivasan et al., 1991). Die gleiche Strategie, die Bienen verwenden, um durch einen Korridor zu fliegen (Kirchner & Srinivasan, 1989; Srinivasan et al., 1991), bietet sich auch für den Menschen an. Nach dieser Strategie wird eine zentrale Position durch Abgleich der scheinbaren Wandgeschwindigkeit erreicht. Die Abgleichstrategie, die bei Bienen in einer „Zentrierungsreaktion“ resultiert, kann prinzipiell ebenso auch auf andere visuelle Größen angewendet werden, welche „paarig“ auftreten, und deren jeweilige Ausprägung vom Abstand von den Seitenwänden abhängt. So kann man in einer Umwelt, wie sie in diesem Experiment dargeboten wurde, eine zen-

trale Position dadurch erreichen, indem man die Ortsfrequenz korrespondierender (homologer) Stellen an den Seitenwänden abgleicht. Liegen zusätzlich Seitenlinien vor, kann dies auch anhand der Winkel der Seitenlinien in der Bildebene erreicht werden.

Geschwindigkeitsinformation wird verwendet

Das Fahrverhalten unter den verschiedenen Bedingungen wurde hinsichtlich zweier Größen analysiert. Die mittlere laterale Position sollte systematische Wirkungen auf den durchschnittlichen Aufenthaltsort zwischen den Korridorwänden aufzeigen, und die Standardabweichung der lateralen Position sollte ein Maß für die Qualität und Zuverlässigkeit der visuellen Information für die Positionskontrolle liefern. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Probanden die Geschwindigkeitsinformation der Seitenwände nutzen. Sie nehmen eine Position näher zur langsamer erscheinenden Seite ein, und behalten diese Position über die restliche Zeit des Durchgangs auch bei. Quantitative Unterschiede im Fahrverhalten ergeben sich, wenn die Probanden zusätzlich Information über ihre Position im Korridor über Seitenlinien bekommen. Wenn diese zusätzliche Information im Konflikt mit der Geschwindigkeitsinformation steht, dann ist die Tendenz, zur Seite mit der langsamer Wandgeschwindigkeit zu korrigieren, kleiner, resultiert aber immer noch in messbaren Abweichungen von der Korridormitte. Dabei scheint es, dass die konkurrierenden Informationen über Geschwindigkeit und über Seitenlinien gleichzeitig betrachtet werden, und es lässt sich kein Hinweis darauf finden, dass in irgendeiner Phase eine Informationsquelle stärker als die andere betrachtet wird. Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu Befunden einer anderen Arbeit, die eine frühe Dominanz der Bewegungsinformation über Seitenlinieninformation feststellten (Duchon, 1999, S. 41; Warren, 1998b, S. 206). Dort wurde berichtet, dass während den ersten sechs Sekunden, die Stärke der Reaktion auf unterschiedliche Wandgeschwindigkeiten nicht davon abhing, ob Seitenlinien zur Verfügung standen oder nicht. Erst danach wurde Seitenlinieninformation betrachtet und es fand eine Rezentrierung zur Korridormitte statt. Möglicherweise waren die Probanden allerdings dort weniger geneigt, vom ersten Augenblick an Seitenlinien zu beachten, da das Experiment als Laufsimulation durchgeführt wurde, während in dem hier vorgestellten Versuch die Probanden an einer Fahrsimulation teilnahmen, einer Aufgabe, in der Fahrbahnbegrenzungen eine wichtige Orientierungsquelle darstellen.

Ortsfrequenzinformation wird genutzt

Anders als bei den Versuchen mit Bienen wurde hier festgestellt, dass die Position im Korridor auch durch unterschiedliche Ortsfrequenzen der Seitenwände beeinflusst werden kann. Die Fahrer zeigen dabei eine deutliche

Korrektur zur Seite mit der höheren Ortsfrequenz, d.h. zu der Seite mit der geringeren Streifenbreite. In diesem Experiment wurde der Effekt unterschiedlicher Ortsfrequenzen bei gleichzeitiger Präsenz von Seitenlinien soweit vermindert, dass er statistisch nicht mehr nachzuweisen war.

Der Ortsfrequenzeffekt kann dadurch erklärt werden, dass die Fahrer auch hier die Annahme machen, dass beiden Seiten das selbe Muster tragen. Erscheinen dann beide Muster nicht gleich, kann mittels einer Abgleichstrategie das gleiche Erscheinungsbild wieder hergestellt werden. Insofern könnte dieser Befund auch zum Phänomen der Größenkonstanz in Verbindung stehen, welches sich in der Alltagserfahrung zeigt, dass zwei unterschiedlich große retinale Abbilder eines bekannten Objektes vom Beobachter nicht als unterschiedlich große Objekte interpretiert werden, sondern als gleich große Objekte in unterschiedlicher Tiefe (Holway & Boring, 1941). Es ist jedoch unklar, ob eine Korrektur bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen entscheidend davon abhängt, dass unterschiedliche Abstände inferiert worden sind (explizite Berücksichtigung der Entfernung), oder ob die Dichte des Musters nur zweidimensional in der Bildebene abgeglichen wird, ohne dass die Entfernung explizit eingehen muss.

Beziehung Ortsfrequenz- zu Geschwindigkeitsinformation

Der Ortsfrequenzeffekt kann auch erklären, warum die Fahrer in den Bedingungen mit unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten diese nicht vollständig ausgleichen. Durch Annäherung an die visuell langsamer erscheinende Wandseite wird die Ortsfrequenz dieser Seite erniedrigt. Das Verhältnis zur Ortsfrequenz der gegenüberliegenden Seite wird dabei verändert, welches dann einem weiteren Geschwindigkeitsabgleich entgegen wirkt. Diese Interpretation wird auch durch die Ergebnisse derjenigen Bedingungen gestützt, in denen gezeigt wurde, dass sich die Tendenz zum Geschwindigkeitsabgleich und die Tendenz zum Ortsfrequenzabgleich aufheben können.

Gleichwohl lässt sich auch feststellen, dass die Geschwindigkeitsinformation *früher verwertet* wird als die Ortsfrequenzinformation. Der zeitliche Vorrang der Geschwindigkeitsinformation wird auch durch den Befund gestützt, dass bei ungleichen Wandgeschwindigkeiten das erste Maximum der lateralen Abweichung *früher* erreicht wird, als in den Bedingungen, in denen sich in die Ortsfrequenz unterscheidet. Im ersten Fall wird das Maximum nach ca. 5 Sekunden und im zweiten Fall nach ca. 9 Sekunden erreicht (siehe auch Abbildung 2.8. und Abbildung 2.10.). Diese Befunde weisen insgesamt darauf hin, dass der Abgleich der Ortsfrequenzen der langsamere Prozess ist.

Winkelgeschwindigkeit oder absolute Geschwindigkeit?

Wenn davon die Rede ist, dass eine Abwendung von der visuell schneller erscheinenden Seite stattfindet, kann man fragen, ob die Winkelgeschwindigkeit oder die scheinbare absolute Geschwindigkeit der Wandseite für dieses Verhalten verantwortlich ist. Die absolute (oder objektive) Geschwindigkeit bezieht sich auf ein externes, nicht egozentrisches Koordinatensystem (z.B. Angaben wie „50 km/h in Süd-Ost-Richtung“), und sie kann mittels einer Skalierung der Winkelgeschwindigkeit auf der Retina mit der wahrgenommenen Distanz des Stimulus geschätzt werden. Diese Frage, ob Winkelgeschwindigkeit oder absolute Geschwindigkeit, ist hier insofern von Bedeutung, da die Ergebnisse nahe legen, dass eine höhere Ortsfrequenz weiter entfernt erscheint. Entsprechend hätte eine höhere Ortsfrequenz einen Einfluss auf die wahrgenommene Geschwindigkeit haben können: In den Durchgängen mit unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten beispielsweise zeigte sich eine Entfernungsvergrößerung zur schnelleren Seite. Diese Abstandsvergrößerung könnte allerdings auch das Resultat davon sein, dass die höhere Winkelgeschwindigkeit als eine höhere absolute Geschwindigkeit wahrgenommen wurde.

Aus den Ergebnissen bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen kann man jedoch diese Interpretation ausschließen: Wenn eine der beiden Seiten aufgrund ihrer höheren Ortsfrequenz den Eindruck erzeugt hätte, sie bewege sich mit einer höheren absoluten Geschwindigkeit, hätte man einen von zwei Ausgängen erwarten dürfen. Wenn nur die Geschwindigkeitsinformation beachtet worden wäre, hätte man eine Abstandsvergrößerung zu dieser Seite sehen müssen. Wenn zusätzlich ein Abgleich der Ortsfrequenzen versucht worden wäre, hätte man vielleicht im Großen und Ganzen keine Positionsänderung beobachten dürfen. De facto wurde aber eine Hinbewegung zur Seite mit der höheren Ortsfrequenz beobachtet. Schließlich gibt es noch einen grundsätzlichen Einwand gegen die Nutzung der absoluten Geschwindigkeit. Sie ist für die Kontrolle der Position im Tunnel ungeeignet, da sie einen konstanten Wert aufweist, der sich nicht mit dem Abstand ändert. Das gleiche Argument spricht auch gegen eine Nutzung der Kontrastfrequenz. Eine Regelgröße, die sich nicht ändern kann, ist für einen Regelungsprozess sinnlos und stellt somit keinen nützlichen Hinweisreiz dar.

Schließlich kommt dann noch in Betracht, dass die Fahrer nicht die Wandgeschwindigkeit in einem absoluten Sinn vergleichen müssten, sondern lediglich einen sichtbaren Geschwindigkeitsunterschied an sich nutzen könnten, um eine Korrektur einzuleiten. Gemäß dieser Sichtweise könnten sich die Fahrer so lange von der schneller erscheinenden Seite entfernen bis kein Unterschied mehr wahrgenommen wird. Das Verhalten sollte hier von

der Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsunterschiede abhängen, und dies wird ausführlicher im nächsten Kapitel betrachtet, in welchem die Ergebnisse eines Diskriminationsexperiments berichtet werden.

Variabilität der Steuerung

Das verbesserte Lenkverhalten mit Hilfe der Information von Seitenlinien zeigt sich besonders in der Variabilität der Steuerung. Durchgehend beobachtet man in allen experimentellen Variationen eine reduzierte Variabilität bei Präsenz von Seitenlinien, bis auf eine Ausnahme. Nur wenn keine Vorwärtsgeschwindigkeit existiert, findet man keine Verbesserung der Stabilität durch zusätzliche Seitenlinieninformation. Dabei garantiert die Präsenz von Seitenlinien keine unverändert niedrige Variabilität, sondern sie wird von der Vorwärtsgeschwindigkeit beeinflusst. Generell findet man eine Zunahme der Variabilität mit zunehmender Geschwindigkeit, ein Befund, der wiederholt in der Literatur zur Höhenkontrolle bei simulierten Flügen berichtet wurde (Flach, Hagen, & Larish, 1992; Flach, Warren, Garness, Kelly, & Stanard, 1997; Wolpert, 1988). Aber auch in Fahrstudien wurde ein Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Variabilität in der lateralen Position gefunden (Godthelp & Käßler, 1988).

Warum nimmt die Variabilität mit der Geschwindigkeit zu? Interessant ist dabei, dass sich die geschwindigkeitsabhängige Variabilität in diesen Experimenten weder (a) als ein Effekt der optischen Information der Seitenlinien, noch (b) als ein Effekt der Steuerung erklären lässt. Wie schon wiederholt ausgeführt, ist die Lage und Orientierung der parallelen, in Fahrtrichtung verlaufenden Seitenlinien unabhängig von der Vorwärtsgeschwindigkeit. Die *Änderungsrate* der Lage und Orientierung der Seitenlinien kann in bestimmten Situationen jedoch sehr wohl von der Geschwindigkeit abhängen. Dies ist vor allem der Fall, wenn in das Steuerungsmodell explizit die Geschwindigkeit eingeht. So ist beispielsweise das Resultat einer Lenkbewegung in einem Pkw sowohl vom Lenkwinkel als auch von der aktuellen Vorwärtsgeschwindigkeit abhängig: Bei gleichem Lenkausschlag wird in der selben Zeit mit einer höheren Geschwindigkeit auch eine größere laterale Versetzung erreicht. Das bedeutet eine Erhöhung der lateralen Geschwindigkeit (und der Standardabweichung der lateralen Geschwindigkeit) und somit auch eine Erhöhung der Änderungsrate der Seitenlinienorientierung. Würden die Fahrer ihr Lenkverhalten nicht verändern, so würde zwangsläufig eine höhere Varianz in der lateralen Position resultieren. Auf diese Situation stellen sich Fahrer beim realen Fahren jedoch ohne größere Schwierigkeiten ein, in dem sie bei schnelleren Fahrten mit einer kleineren Zeitverzögerung reagieren (Donges, 1978; Hildreth, Beusmans, Boer, & Royden, 2000). Durch diese kleinere Lenkverzögerung bleibt der laterale Fahrbereich unverändert, bzw. wird höchstens geringfügig ver-

größert (Godthelp & Käppler, 1988; Godthelp, Milgram, & Blaauw, 1984). Man könnte nun spekulieren, dass die Probanden in diesem Experiment ihr Lenkverhalten bei höheren Geschwindigkeiten nicht angepasst hätten, und somit zwangsläufig eine höhere Variabilität entstehen musste. Das hier benutzte Steuerungsmodell war jedoch von der simulierten Vorwärtsgeschwindigkeit unabhängig - die laterale Geschwindigkeit hing nur von der Größe der Auslenkung der Maus ab. Das gleiche Lenkverhalten hätte somit auch eine gleich hohe Variabilität der Position im Korridor zur Folge haben müssen. Die erhöhte Varianz kann demnach nur durch Einflussgrößen auf der perceptuellen Seite erklärt werden.

Eine mögliche Integration

Eine Hypothese, die unterschiedliche Performanzniveaus bei der Höhenregulation von Flugzeugen erklären soll, geht von einem Signal-zu-Rauschen-Modell aus (Flach et al., 1992; Flach et al., 1997). Ausgangspunkt bildet der Befund, dass bei mehreren visuellen Informationsquellen die Genauigkeit oftmals gegenüber einer einzelnen Informationsquelle verschlechtert wird. Wird beispielsweise die Bodenebene durch eine parallele Textur (d.h. Linien in Flugrichtung) angegeben, wird eine höhere Genauigkeit erreicht als bei einem Flug über eine gitterförmige Textur, welche sowohl parallele wie auch Linienelemente senkrecht zur Flugrichtung enthält (Wolpert, 1988).

In diesem Modell von Flach und seinen Kollegen (Flach et al., 1992, 1997), wird angenommen, dass das Verhältnis der optischer Aktivität, welche bei Änderungen entlang der zu kontrollierenden Achse oder Dimension auftritt (hier der Abstand zum Grund), zur Aktivität, die nicht mit der Regulation in Verbindung steht, entscheidend für die Genauigkeit des Kontrollvorgangs ist. Dies soll an einem Beispiel erläutert werden. Dazu nehmen wir vereinfachend an, dass die relevante visuelle Information für die Höhenregulation der in die Bildebene projizierte Winkel zwischen den parallelen verlaufenden Linien auf dem Boden ist. Dieser Winkel ist dann insofern das Signal für den Kontrollvorgang, da jede Änderung der Höhe auch mit einer Änderung dieses Winkels einher geht. Alles weitere an Bewegung im Bild stellt eine Art Rauschen dar, das die Entdeckung des Signals erschwert. In diesem Modell würde dann der optische Fluss, der von senkrechten Texturelementen während des Vorwärtsflugs erzeugt wird, als Rauschen betrachtet werden. Je höher die Vorwärtsgeschwindigkeit, umso höher wäre das Rauschen. Es resultiert ein schlechteres Verhältnis von Signal zu Rauschen, und das führt zu einer geringeren Performanz, wenn zusätzlich zu den parallelen Texturelementen noch senkrechte Texturelemente dazu kommen.

Der Kernpunkt dieses Modells ist also die Assoziation der visuellen Aktivität mit der Kontrolldimension. Dieses Modell ermöglicht es auch, Leistungsverschlechterungen vorauszusagen, wenn nur eine Informationsquelle vorliegt. Bei einer parallelen Textur würde man eine Verschlechterung der Höhenregulation erwarten, wenn externe Faktoren, wie beispielsweise Seitenwind, die laterale Position beeinflussen würden. Als Folge würde sich die Orientierung der Linien in der Bildebene ändern. Die entstandene Änderung der Orientierung der Linien wäre jedoch nicht mit einer Höhenänderung assoziiert, und würde deshalb als Rauschen gelten. Schließlich könnte man nach diesem Modell auch Leistungseinbußen erwarten, wenn dem Lenker mehrere Freiheitsgrade zur Verfügung stünden und sein Verhalten insgesamt suboptimal wäre. Im Beispiel der Höhenregulation könnte dies bedeuten, dass zusätzlich zu den Änderungen in vertikaler Richtung (entlang der relevanten Dimension), auch Bewegungen in horizontaler Richtung erlaubt sind. Ein suboptimales Verhalten bedeutet in diesem Fall, dass der Kontrolleur gelegentlich unangebrachte Aktivität in horizontaler Richtung zeigt (so genanntes Übersprechen oder cross-talk), vielleicht weil er mit dem Steuerelement oder dem Eingabegerät nicht hundertprozentig zurechtkommt. Dies aber führt, ähnlich wie beim Beispiel mit dem Seitenwind, zu optischer Aktivität, die nicht mit der Kontrolldimension assoziiert ist. Das wiederum würde die Wahrnehmung des relevanten Signal erschweren und eine Performanzminderung wäre die Folge.

Das beschriebene Signal-zu-Rauschen-Modell von Flach et al. (1992) soll hier spezifischer als die „Hypothese der kontrollkorrelierten Aktivität“ bezeichnet werden. Die meisten Befunde zur Variabilität der Position im vorliegenden Experiment können mit Hilfe der Hypothese der kontrollkorrelierten Aktivität recht gut erklärt werden. Die Erörterung, warum eine höhere Geschwindigkeit auch zu einer Erhöhung der Standardabweichung der Position führt, lässt sich analog zum Beispiel der Höhenregulation führen: Aufgrund der Resultate des vorliegenden Experiments kann man davon ausgehen, dass sowohl Ortsfrequenz-, Geschwindigkeits-, wie auch Seitenlinieninformation *gemeinsam* die laterale Kontrolle steuern. Ferner kann man postulieren, dass aus jeder dieser Informationsquellen ein spezifisches Signal für die Positionskorrektur entnommen wird. Das relevante Signal in der Ortsfrequenzinformation kann die Dichte des Streifenmusters oder die räumliche Trennung von zwei Texturkanten auf der linken und rechten Seite sein. Das Signal in der Geschwindigkeitsinformation ist das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten homologer Bereiche im visuellen Feld, und das Signal der Seitenlinieninformation der Winkel oder die Asymmetrie der Seitenlinien in der frontoparallelen Projektion. Entscheidend ist, dass sich die drei Informationsquellen gegenseitig beeinflussen können, in dem sie jeweils als Rauschen für die anderen Signale fungieren. Wenn beispielsweise

die Vorwärtsgeschwindigkeit von Null auf 10 m/s erhöht wird, liegt plötzlich auch Geschwindigkeitsinformation vor, die genutzt werden kann. Die Bewegung des Stimulus kann aber die Wahrnehmung der anderen zwei Signale negativ beeinflussen. Sowohl die Wahrnehmung der Dichte des Streifenmusters wie auch die Wahrnehmung der Lage der Seitenlinien kann bei einem bewegten Stimulus schwieriger werden. Wenn zwar ein zusätzlich nutzbares Signal hinzukommt, aber zwei andere dadurch „verrauschter“ werden, kann das zur Folge haben, dass in einer nachfolgenden Stufe, in der die einzelnen Signale zu einer Schätzung der Position gemittelt werden, ein insgesamt unsicherer Wert berechnet wird. Aus einer unsicheren Schätzung der Position resultiert dann die beobachtete Erhöhung der Variabilität in der lateralen Position.

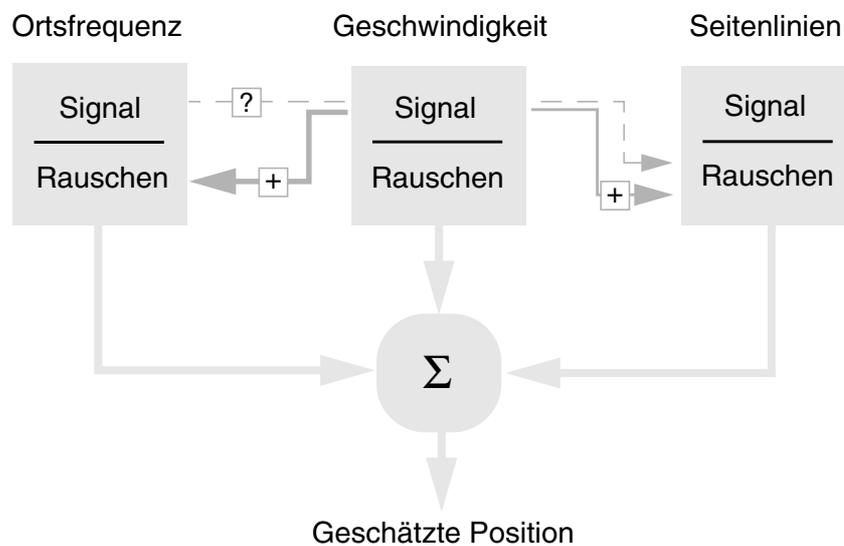


Abbildung 2.16. Schema der gegenseitigen Beeinflussung der Informationsquellen für die Kontrolle der lateralen Position. Jede der drei Informationsquellen, Ortsfrequenz, Geschwindigkeit und Seitenlinien, kann in der Szene vorhanden oder nicht vorhanden sein. Visuelle Bewegung, die aufgrund der longitudinalen Geschwindigkeit entsteht, beeinflusst negativ die Information über die Ortsfrequenz und die der Seitenlinien, in dem sie das Rauschen erhöht (durchgezogene Linien). Dabei kann die Ortsfrequenzinformation stärker betroffen sein als die Seitenlinieninformation. In diesem Schema sind weitere Wechselwirkungen denkbar, etwa von Ortsfrequenzinformation zu der Wahrnehmung der Lage der Seitenlinien (dünne, gestrichelte Linie). In einer Integrationsstufe werden dann die Einzelsignale gemittelt, nachdem sie ggf. unterschiedlich gewichtet wurden.

Unter diesem Ansatz kann auch der Befund interpretiert werden, dass die Variabilität in der Position bei Wegfall der Seitenlinieninformation nicht zunimmt, wenn keine Vorwärtsgeschwindigkeit existiert. Das deutet darauf hin, dass die Qualität der Ortsfrequenzinformation bereits allein schon recht hoch ist, und dass mit der zusätzlichen Darbietung von Seitenlinien der ohnehin schon niedrigen Fahrfehler nicht noch weiter verringert werden kann. Mit steigender Vorwärtsgeschwindigkeit wird die Nutzung der Orts-

frequenzinformation jedoch zunehmend erschwert - die Variabilität steigt. Zusätzlich kann man die nicht un plausible Annahme machen, dass die Ortsfrequenzinformation durch die Vorwärtsbewegung stärker negativ beeinflusst wird als die Seitenlinieninformation: Die Seitenlinien waren hier räumlich getrennt von den Elementen, die die Vorwärtsbewegung anzeigten. Die senkrecht zur Fahrtrichtung verlaufenden Kanten des Wandmusters waren dagegen Bestandteil sowohl der Ortsfrequenzinformation aber auch der Träger der empfundenen Vorwärtsbewegung. Dies kann dann das Datenmuster erklären, dass auch mit Seitenlinien eine Erhöhung der Variabilität bei höherer Geschwindigkeit zu verzeichnen ist, diese aber im Vergleich zu Durchgängen ohne Seitenlinien geringer ausfällt.

Beziehung zu Studien zur Headingdiskrimination

In diesem Experiment wurde der Beitrag der Geschwindigkeitsinformation für die Kontrolle der Lokomotion untersucht, indem die Geschwindigkeiten im visuellen Feld systematisch manipuliert wurde. Zwei andere Arbeiten untersuchten ebenfalls die Bedeutung der Geschwindigkeit zur Steuerung der Bewegung, und an dieser Stelle sollen die Befunde miteinander verglichen werden. Insbesondere soll eine Auseinandersetzung damit erfolgen, was die hiesigen Befunde *nicht* bedeuten und wie sie *nicht* interpretiert werden sollten.

Beide Arbeiten war Untersuchungen zur so genannten Headingdiskrimination, in denen nach der Genauigkeit gefragt wurde, mit der Menschen die momentane Bewegungsrichtung aus optischem Fluss schätzen können. Eines dieser Experimente zeigte, dass die zufällige Variation der Geschwindigkeit einzelner Punktelemente in einem expandierenden Zufallspunktemuster die Leistung in der Richtungsschätzung (Heading) nicht beeinflusst (Warren et al., 1991a). Dieses Ergebnis wurde so interpretiert, dass das globale Muster einer radialen Expansion und nicht die Verteilung der Geschwindigkeiten in diesem Muster die Wahrnehmung der Bewegungsrichtung bestimmt. Die hier präsentierten Befunde zeigen jedoch eine eindeutige Beeinflussung der aktiven Kontrolle durch asymmetrische Geschwindigkeiten im visuellen Feld, die aber nicht unbedingt als Widerspruch zwischen den Studien interpretiert werden muss. Denn die Kontrolle der lateralen Position und die Kontrolle der Bewegungsrichtung könnten sehr wohl als separate Prozesse gesehen werden. Zu dieser Vorstellung würde das Zwei-Ebenen-Modell von Donges und die Befunde, die dieses unterstützen, passen (Donges, 1978; Land & Horwood, 1995; Land & Lee, 1994). Danach kann die erste Ebene, die vorausschauend Informationen über die zukünftige Richtung der Bewegung verarbeitet und verhältnismäßig früh Bewegungsentscheidungen antizipiert, in Beziehung zur Headingdiskrimination stehen, während die zweite Ebene, die für die kompensatori-

sche Regelung im Nahbereich zuständig ist, der hier vorgestellten lateralen Kontrolle entsprechen.

Eine weitere Studie manipulierte die Geschwindigkeitsinformation während der Headingschätzung im Gegensatz zur Arbeit von Warren et al. (1991) nicht indem sie Geschwindigkeit der Punkte zufällig variierte, sondern indem systematisch alle Punkte auf einer Seite in ihrer Geschwindigkeit verändert wurden (Dyre & Andersen, 1997). Durch Bewegung entlang unterschiedlich tiefer Punktevolumen wurde ein asymmetrisches Geschwindigkeitsfeld erreicht. Beispielsweise wurde auf dem rechten visuellen Halbfeld ein Punktevolumen mit einer Tiefe von 7.5 m und auf dem linken ein Volumen von 2.5 m dargeboten. Das Volumen auf der rechten Seite hatte somit eine niedrigere durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit. Die Ergebnisse von Dyre und Andersen (1997) zeigten, dass die Richtungsschätzungen einen systematischen Fehler zur Seite mit der niedrigeren Geschwindigkeit hatten, d.h. in diesem Beispiel nach rechts. Als eine notwendige Voraussetzung für diesen systematischen Headingfehler identifizierten die Autoren die Rigidität der Punktevolumen, d.h. dass die Beobachter nicht den Eindruck hatten, dass sich die Punkte innerhalb eines Punktevolumens relativ zueinander bewegten. Diese Bedingung wurde in der Arbeit von Warren et al. (1991) nicht erfüllt, und könnte die unterschiedlichen Befunde erklären. Ferner berichteten Dyre und Andersen (1997) auch von einer Anzahl an Probanden, die die eigentlich geradlinige Bewegung als kurvig empfanden, jeweils zur Seite mit der niedrigeren Geschwindigkeit gekrümmt.

Sowohl der systematische Bias in den Headingurteilen als auch der Eindruck einer Bewegung auf einer kurvigen Bahn passen nicht zu den hier gemachten Beobachtungen. Kein einziger Proband im Bientunnel äußerte spontan, er hätte den Eindruck, er bewege sich auf einer kurvigen Bahn. Wäre dies jedoch der Fall gewesen, oder wäre die Richtungsschätzung wie von Dyre und Andersen (1997) berichtet, systematisch beeinflusst worden, hätte man eine Korrekturbewegung zu der Seite mit der höheren Wandgeschwindigkeit (und nicht entgegen) erwartet. Insofern kann die Hinbewegung zu der Seite mit der niedrigeren Geschwindigkeit nicht als ein Resultat einer falschen Richtungsschätzung angesehen werden. Ein Grund dafür, dass niemand eine kurvige Bahn in diesem Experiment wahrnahm oder entsprechend reagierte, liegt vielleicht darin, dass das Muster der Seitenwände durch gleichabständige Streifen dargestellt war. Zusätzliche Hinweisreize, wie Dichte- und Kompressionsgradienten in diesem visuellen Stimulus, können dazu beigetragen haben, die Seitenwände nicht nur als rigide, sondern auch als flache Ebenen wahrzunehmen (Cutting & Millard, 1984). Auf

dieser Grundlage ist dann nicht zu erwarten, dass die Relativbewegung der Kanten als Kurvenfahrt interpretiert wird.

Seitenlinien als die einzig wichtige Information?

Während der Fertigstellung dieser Arbeit ist eine weitere Arbeit erschienen, die die gleiche Fragestellung untersuchte (Duchon & Warren, 2002). Versuchspersonen mussten ihre Position ebenfalls in einem Korridor mit Hilfe eines Joysticks oder mit aktiver Bewegung auf einem Laufband kontrollieren, während die Präsenz von Seitenlinien und die Ortsfrequenzinformation bei ähnlichen simulierten Geschwindigkeiten manipuliert wurden. In ihren Experimenten gelangten Duchon und Warren (2002) in qualitativer Hinsicht zu den gleichen Resultaten. Die laterale Kontrolle während der Lokomotion hing sowohl von Seitenlinien- und Geschwindigkeitsinformation, sowie von dem Maßstab des Wandmusters ab. Ein Modell wurde angeboten, nach dem jede der drei Informationsquellen unterschiedliche gewichtet und anschließend linear kombiniert werden sollen. Nach diesem Modell wurde der Beitrag der Seitenlinieninformation auf 62%, der Geschwindigkeit auf 27% und des Maßstabs der Wandtextur auf nur 3% geschätzt. Der größte Unterschied liegt somit in der Bedeutung des Maßstabs der Wandtextur, oder wie es hier bezeichnet wurde, der Ortsfrequenz des Musters.

Der niedrige Beitrag des Wandmusters kann vielleicht zum Teil dadurch erklärt werden, dass Duchon und Warren ein unregelmäßiges, farbiges Fleckenmuster verwendet haben (Voronoi-Mosaik), das, im Gegensatz zu dem hier benutzten regelmäßigen Streifenmuster, weniger klare Strukturen enthielt, und dadurch ein Vergleich des Maßstabs bzw. der Ortsfrequenz zwischen beiden Seiten erschwert worden sein könnte. Dies würde bedeuten, dass die Gewichtung der Informationsquellen aber veränderlich ist, und beispielsweise von der spezifischen Struktur der Umgebung abhängt. Ein äquivalentes Argument, wenn auch mit umgekehrten Vorzeichen, verwenden auch Duchon und Warren, um die Unterschiede zwischen beiden Studien zu erklären. Sie argumentieren, dass hier die Geschwindigkeitsinformation vielleicht deshalb nicht stärker gewichtet wurde als die Ortsfrequenzinformation, weil die relativ breiten Streifenmuster ein schwächeres Geschwindigkeitssignal erzeugten als ihr Voronoi-Mosaik. Einigkeit sollte demnach darin bestehen, dass die Struktur der Umgebung ein wichtiger Faktor für die Gewichtung ist, aber auch dass Wechselwirkungen zwischen den Informationsquellen vorliegen können, wie sie ja implizit argumentieren. Dennoch scheinen ihnen Wechselwirkungen entgangen zu sein, wie sie sich hier beispielsweise auch durch die Veränderung der Vorwärtsgeschwindigkeit zeigten, vermutlich weil sie nur die Position und nicht die Variabilität im Korridor analysierten. Eine lineare Kombination unterschiedlicher Informa-

tionsquellen mit festen Gewichten kann deshalb nur ein erstes, grobes Modell für das tatsächliche Geschehen sein. So können durch eine lineare Kombination von Informationsquellen dann auch keine Befunde nachbildet werden, wie die des zeitlichen Vorrangs der Geschwindigkeits- vor der Ortsfrequenzinformation.

Die Bedeutung der Geschwindigkeitsinformation für die laterale Kontrolle im „Bientunnel“ kann schließlich folgendermaßen zusammengefasst werden. Der Unterschied der Winkelgeschwindigkeiten im visuellen Feld stellt ein verhaltensrelevantes Signal für die laterale Regulation dar, vor allem wenn andere Hinweisreize schwach oder nicht vorhanden sind. Die Fahrer berücksichtigen nicht ausschließlich dieses Geschwindigkeitssignal, sondern kombinieren diese Information mit anderen geometrischen Informationen, wie die der Lage von Seitenlinien und der Ortsfrequenz des Musters. Die Reaktion auf das Geschwindigkeitssignal erfolgt jedoch verhältnismäßig schnell - sie lässt sich früher beobachten als eine Reaktion auf unterschiedliche Ortsfrequenzen. Ferner ließen sich keine Hinweise finden, nach denen die Kontrastfrequenz und nicht die Geschwindigkeit des Stimulus die entscheidende Größe für die laterale Regulation ist. Wenn nutzbare Geschwindigkeitsinformation zur Verfügung steht, kann allerdings auch die Informationsaufnahme aus anderen Quellen beeinträchtigt werden, so dass insgesamt eine schlechtere Performanz resultiert als ohne Geschwindigkeitsinformation.

Bientunnel - niedrige Geschwindigkeiten und Sinusmuster

In diesem Abschnitt soll die Frage geklärt werden, ob die Abgleichstrategie, welche auf die Geschwindigkeits- und Ortsfrequenzinformation angewendet wurde, auch bei Bewegungen mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten zu beobachten ist. Dabei sollte im Speziellen geprüft werden, ob die gleich starke Gewichtung der Geschwindigkeits- und der Ortsfrequenzinformation ein spezifisches Ergebnis der verwendeten Parameter ist, oder ob sich die Gewichte diese zwei Informationsquellen mit veränderten Parameter auch verschieben. Zusätzlich wurde das Fahrverhalten nicht nur mit Streifenmustern auf den Tunnelwänden, sondern auch mit Sinusmustern untersucht.

Die im vorigen Abschnitt geschilderte Beobachtung, dass die Position durch das Verhältnis der Geschwindigkeiten der linken und rechten Wandseite beeinflusst wird, legt nahe, dass ein Geschwindigkeitsunterschied erst einmal detektiert werden muss, bevor er verhaltenswirksam werden kann. Insofern sollte das Verhalten dann auch davon abhängen, wie gut die Unterscheidungsfähigkeit für die jeweiligen Geschwindigkeiten ist. Eine niedrige Unterscheidungsfähigkeit müsste dann zur Folge haben, dass der Geschwindigkeitsunterschied weniger gut verwertet werden kann, in dem

Sinne, dass ein höherer Geschwindigkeitsunterschied benötigt wird, bevor eine Korrektur eingeleitet wird. Wenn dies der Fall ist, dürfte man möglicherweise beobachten, dass eine größere laterale Variabilität in der Position resultiert. Eine niedrige Unterscheidungsfähigkeit könnte auch dazu führen, dass das Geschwindigkeitssignal für den Betrachter an Reliabilität einbüßt und weniger stark gewichtet wird.

Mit psychophysischen Messungen wurde festgestellt, dass das visuelle Feld hinsichtlich der Geschwindigkeitsdiskrimination und dem Betrag der Geschwindigkeit nicht homogen ist. So finden Orban, Van Calenbergh, De Bruyn und Maes (1985), dass der Verlauf der Diskriminationsschwellen über unterschiedliche Referenzgeschwindigkeiten an allen Exzentrizitäten im Blickfeld jeweils wie eine U-förmige Funktion verläuft. Höhere Diskriminationsschwellen beobachtet man dabei vor allem bei niedrigen Geschwindigkeiten. Es sind auch die niedrigen Geschwindigkeiten, bei denen man unterschiedliche Weber-Quotienten beobachtet, wenn man an verschiedenen Orten im Blickfeld testet, während die Weber-Quotienten für hohe Geschwindigkeiten kaum mit der Exzentrizität variieren (Orban, Van Calenbergh, De Bruyn, & Maes, 1985). Eine Reihe von Autoren berichtet, dass die Geschwindigkeitsdiskrimination ab einer Geschwindigkeit von 1-2 °/s über einen weiten Bereich relativ konstant bleibt, wohingegen bei Geschwindigkeiten unter 1 °/s die Diskriminationsleistung stark abfällt (Bonnet, 1984; Johnston, Benton, & Morgan, 1999; McKee & Nakayama, 1984; Turano & Pantle, 1989). Ferner wurde gezeigt, dass die Diskriminationsschwellen bei niedrigen, nicht aber bei höheren Geschwindigkeiten abhängig vom Kontrast des Stimulus sind, wobei die Grenzen zwischen 1 und 3 °/s lokalisiert wurden (Johnston et al., 1999; McKee, Silverman, & Nakayama, 1986). Da eine Kontrastabhängigkeit auch bei Mustern mit niedrigen Orts- und niedrigen Kontrastfrequenzen gezeigt wurde, liegen Hinweise vor, dass die Geschwindigkeit des Stimulus allerdings nicht der einzig bestimmende Faktor sein dürfte (Gegenfurtner & Hawken, 1996).

Im Bientunnelexperiment wurde eine Korridorseite zwar mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt, diese resultierte jedoch in Winkelgeschwindigkeiten auf der Projektionsfläche, die in einem weiten Geschwindigkeitsbereich lagen. Bewegte sich der Fahrer in der Mitte des Korridors mit einer Vorwärtsgeschwindigkeit von 10 m/s, umfasste dieser Bereich Winkelgeschwindigkeiten von ca. 0.09 °/s an der entferntesten bis 114 °/s an der nächsten sichtbaren Stelle im Korridor. Bei Abweichungen von der Korridormitte entstanden sogar größere Differenzen zwischen maximaler und minimaler Winkelgeschwindigkeit. Zwar lagen dann die Stellen des Korridors, die einen Anstieg der Unterscheidungsleistung erwarten lassen (< 1 Grad/s), in einer Entfernung, die auf der Projektion nur einen kleinen

Bereich einnimmt - in dem angeführten Beispiel in einem zentralen horizontalen Bereich von ca. 10° . Doch kann man aus den im vorigen Absatz angeführten Literaturstellen nicht einschätzen, welchen Stellenwert dieser kleine zentrale Bereich für die Entdeckung von Geschwindigkeitsunterschieden insgesamt hat, wenn die Bewegung das ganze visuelle Feld einnimmt. Durch eine starke Verlangsamung der simulierten Fahrt würde der Bereich mit einer niedrigen Diskriminationsleistung deutlich vergrößert werden.

Auch nach der Hypothese der kontrollkorrelierten Aktivität könnte man erwarten, dass sich das relative Gewicht von Geschwindigkeits- und Ortsfrequenzinformation verändert, wenn die Fahrgeschwindigkeit sich erniedrigt. Die Ortsfrequenzinformation sollte weniger „gestört“ werden, und entsprechend würde man eine Aufwertung dieses Hinweisreizes gegenüber der Geschwindigkeitsinformation erwarten. Dies sollte sich vor allem darin widerspiegeln, dass unterschiedliche Ortsfrequenzen eine stärkere Positionsveränderung verursachen.

Bisher wurde ein rechteckig-moduliertes Helligkeitsmuster verwendet, dessen fundamentale Wellenlänge entweder 10 m oder 20 m war. Aufgrund der perspektivischen Projektion bildeten sich diese Wellenlängen als ein kontinuierlicher Gradient an Ortsfrequenzen ab, der mit exzentrischer Position in der Bildebene abnahm. Solche rechteck-modulierten Streifenmuster beinhalten jedoch auch an einer bestimmten exzentrischen Position nicht nur eine Ortsfrequenz. Wie in Abbildung 2.17. dargestellt, kann eine solche Helligkeitsmodulation als eine Summe überlagerter Sinusschwingungen aufgefasst werden. Addiert man zu einer Grundfrequenz nacheinander sogenannte Oberschwingungen auf, deren Frequenzen jeweils ein ungeradzahliges Vielfaches der Grundfrequenz sind, erreicht man zunehmend einen Funktionsverlauf der sich immer besser der rechteckigen Stufenfunktion der Helligkeit eines Streifenmusters annähert. Diese Summierung zu einem stufenförmigen Helligkeitsverlauf ist ein Beispiel für das so genannte Fourier-Theorem, nach dem sich jedes periodische Signal, egal welcher Komplexität, durch lineare Kombination von Sinusschwingungen mit entsprechender Frequenz und Phase darstellen lässt.

Ein rechteckig-moduliertes Streifenmuster weist gegenüber einem rein sinus-modulierten Streifenmuster zwei wichtige Unterschiede auf, die in diesem Zusammenhang die Abwandlung des Musters in eine sinus-modulierte Textur interessant machen. Erstens besitzt das rechteckig-modulierte Muster, wie dargestellt, verschiedene Anteile an höheren Frequenzen. Es wird davon ausgegangen, dass die menschliche Mustererkennung über mehrere räumliche Frequenzkanäle erfolgt. Jeder Kanal ist auf bestimmte Ortsfrequenzen spezialisiert, und antwortet nur auf Ortsfrequenzen, die in einem eingeschränkten Frequenzband liegen (für eine ausführliche Darstel-

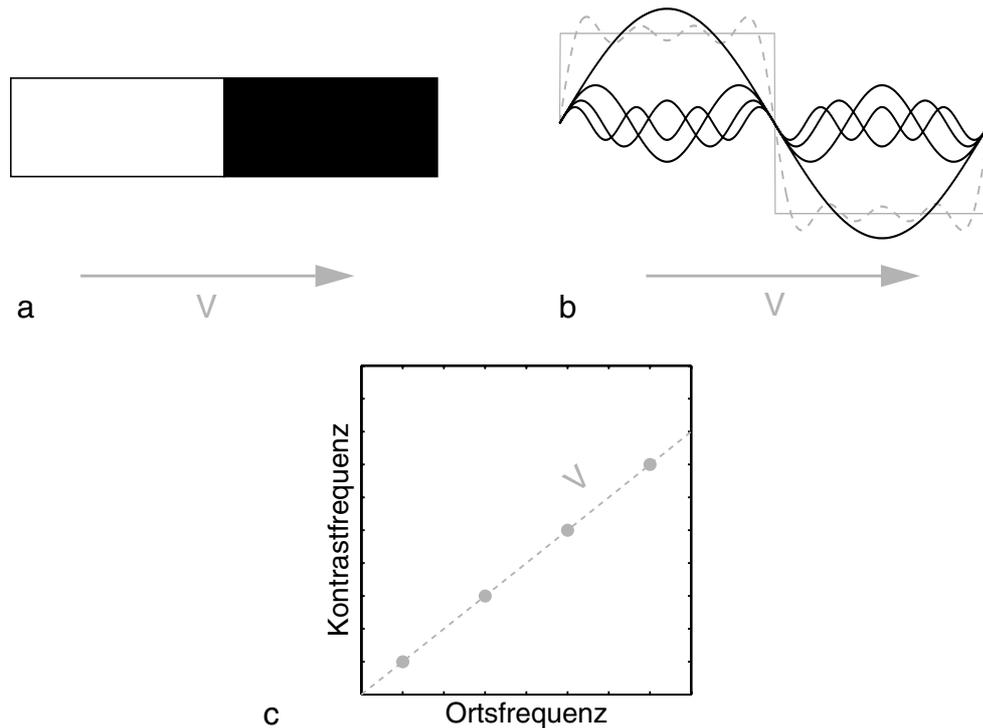


Abbildung 2.17. Darstellung einer bewegten Helligkeitskante (a), die sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit V nach rechts bewegt. Nach dem Fourier-Theorem kann die Helligkeitskante als die Summe einzelner Sinusschwingungen aufgefasst werden, und in diese zerlegt werden (b). Mit bereits vier Sinusschwingungen lässt sich der stufenförmige Verlauf (durchgezogene graue Linie) relativ gut annähern (gestrichelte graue Linie). Da sich die einzelnen, räumlich sinusoidalen Helligkeitsänderungen mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, resultieren jeweils unterschiedliche Kontrastfrequenzen ($KF = V \times OF$). Trägt man das Fourier-Amplitudenspektrum einer solchen Kante in einem Ortsfrequenz-/Kontrastfrequenzdiagramm auf, liegen alle Punkte auf einer Linie, deren Steigung der Geschwindigkeit V entspricht (c). Die vier Punkte stellen hier die vier Sinusschwingungen dar, in die die stufenförmige Helligkeitskante zerlegt wurde.

lung siehe De Valois & De Valois, 1988). Die Anzahl dieser räumlichen Frequenzkanäle wurde für die Fovea auf sechs geschätzt (Wilson, McFarlane, & Phillips, 1983). Ein rechteck-moduliertes Muster spricht demnach mehrere Kanäle an. Da die Amplitude der einzelnen Ortsfrequenzkomponenten und nicht der Gesamtkontrast des Stimulus die Detektion bestimmt, können Muster, die auch höhere Frequenzen beinhalten, bei gleichem Kontrast leichter erkennbar sein als sinus-modulierte Streifenmuster (Campbell & Robson, 1968; Graham & Nachmias, 1971). Die Kontrastsensitivitätsfunktion des menschlichen visuellen Systems erreicht bei mittleren Ortsfrequenzen ein Maximum, d.h. es zeigt eine sogenannte Bandpass-Charakteristik (Kelly, 1984; Koenderink & van Doorn, 1979). Insbesondere wenn zu einer niedrigen Grundfrequenz, wie sie hier in exzentrischen Bereichen des visuellen Feldes vorkam, eine Reihe von Oberschwingungen hinzugenommen werden, kann dies eine leichtere Detektierbarkeit des Stimulus zur Folge haben:

Denn die Oberschwingungen liegen dann eher auf dem aufsteigenden Ast der Kontrastsensitivitätsfunktion. Wenn zu einer Grundfrequenz, die selbst schon nahe dem Maximum der Kontrastsensitivitätsfunktion liegt, höherfrequente Schwingungen hinzukommen, liegen diese auf dem absteigenden Ast der Kontrastsensitivitätsfunktion, und es sollte keine leichtere Detektierbarkeit resultieren². Das Vorliegen höherer Ortsfrequenzen im rechteck-modulierten Stimulus könnte auch für die Wahrnehmung der Geschwindigkeit von Bedeutung sein. Seit geraumer Zeit wird eine intensive Debatte geführt, ob die Struktur eines Musters die wahrgenommene Geschwindigkeit beeinflusst (Campbell & Maffei, 1981; Diener, Wist, Dichgans, & Brandt, 1976; McKee et al., 1986; Smith & Edgar, 1990; Smith & Edgar, 1991). Den Befürwortern zufolge steigt die empfundene Geschwindigkeit mit höherer Ortsfrequenz des Stimulus, da mit einer höheren Ortsfrequenz auch höhere Kontrastfrequenzen einher gehen. Im unteren Graphen der Abbildung 2.17. ist der Zusammenhang zwischen den Ortsfrequenzen einer bewegten, stufenförmigen Helligkeitskante, der Geschwindigkeit und der Kontrastfrequenz verdeutlicht. Auf diese angerissene Debatte wird im nächsten Kapitel näher eingegangen, hier soll die Feststellung einer möglichen Beeinflussung der Geschwindigkeitswahrnehmung durch höhere Ortsfrequenzen genügen.

Der zweite große Unterschied zwischen beiden Modulationsarten liegt darin, dass im rechteck-modulierten Steifenmuster durch die steilen Intensitätsänderungen deutliche Kanten zwischen den weißen und schwarzen Streifen vorliegen, während im sinus-modulierten Muster die Helligkeitsänderung allmählich erfolgt. In der Diskussion des vorigen Experimentes wurde darüber spekuliert, ob die Ortsfrequenz beider Seiten die entscheidende Größe für die Korrektur ist, oder eher die Separierung bzw. der Raumwinkel zwischen zwei einzelnen Kanten an entsprechenden Stellen. Wenn die Separierung der Kanten einen wichtigen Hinweis dafür liefert, dass Unterschiede im Muster zwischen den Korridorseiten existieren, sollte man erwarten, dass in Durchgängen mit ungleichen Wellenlängen auf beiden Seiten die Fahrer bei einem Sinusmuster weniger stark reagieren als bei einem rechteck-modulierten Muster.

Sowohl die Erniedrigung der Vorwärtsgeschwindigkeit wie auch die Verwendung von sinus-modulierten Wandmustern lassen erwarten, dass der im vorigen Experiment beobachtete gleich große Beitrag von Ortsfrequenz- und Geschwindigkeitsinformation verändert werden kann. Die Gründe dafür können zum einen in unterschiedlichen Diskriminationsleistungen liegen oder auch in den reduzierten Wechselwirkungen zwischen

2) Diese Einsicht ist Felix Wichmann zu verdanken.

den Hinweisreizen, wie sie nach der Hypothese der kontrollkorrelierten Aktivität auftreten müssten.

Methoden

Der Versuchsaufbau, die Durchführung und die visuellen Stimuli entsprachen im Wesentlichen dem ersten Bientunnel-Experiment. Die Änderungen betrafen lediglich die simulierten Geschwindigkeiten und die Hinzunahme von sinus-modulierten Wandmustern. Die Abfolge der Versuchsbedingungen war hier randomisiert anstatt geblockt.

Zehn Versuchsteilnehmer im Alter zwischen 18 und 36 Jahren (Mittelwert 21.3 Jahre) hatten die Aufgabe mit Hilfe der Computermaus für 20 Sekunden in der Mitte eines Korridors zu steuern. Die seitliche Auslenkung der Maus war wie im vorigen Experiment proportional zur lateralen Geschwindigkeit, und konnte eine maximale laterale Geschwindigkeit von 1.8 m erreichen.

Die Seitenwände wurden mit einer Vorwärtsgeschwindigkeit von 1.43 m/s oder 2.86 m/s bewegt (entsprechen 5.15 und 10.3 km/h). Bei einer unveränderten Korridorbreite von 10 m und einer zentralen Position im Korridor betragen die minimale Winkelgeschwindigkeit $0.013^\circ/\text{s}$ und die maximale Winkelgeschwindigkeit $16.4^\circ/\text{s}$.

Die Muster der Seitenwände waren entweder rechteck-modulierte senkrechte Muster (Streifenmuster) mit einer fundamentalen Wellenlänge von 10 m bzw. 20 m, oder Sinusmuster mit gleicher Wellenlänge und gleichem Kontrast. Die Wandmustertexturen hatten eine Größe von 256 mal 256 Pixel bei 256 Grauwertstufen, und stellten über diesen Bereich entweder eine oder zwei Perioden mit maximalen Kontrast dar. Abweichend von den vorigen visuellen Darbietungen wurden Seitenlinien nicht präsentiert.

Jeder Teilnehmer absolvierte 40 Durchfahrten, in denen jeweils eine der möglichen Stimuluskombination getestet wurde. Die Stimuluskombination stammten aus einer von vier Gruppen, die den Bedingungen im vorigen Experiment entsprechen: (a) Kontrollbedingung mit jeweils gleicher Geschwindigkeit und gleicher Ortsfrequenz an beiden Seiten, (b) unterschiedliche Geschwindigkeiten, (c) unterschiedliche Ortsfrequenzen und (d) unterschiedliche Geschwindigkeiten gepaart mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen (siehe auch Abbildung 2.5.).

In den Bedingungen in (a) wurden zwei Muster (sinus- und rechteck-moduliert) mit zwei Ortsfrequenzen (10 und 20 m) und zwei Geschwindigkeiten (1.43 und 2.86 m/s) kombiniert und zwei mal wiederholt (= 16 Durchgänge). In (b) wurden zwei Muster mit zwei Ortsfrequenzen und der Seite

der höheren Geschwindigkeit (links oder rechts) kombiniert (= 8 Durchgänge). Entsprechend bestanden die Bedingungen in (c) aus einer Kombination von zwei Mustern mit zwei Geschwindigkeiten und zwei Seiten der höheren Ortsfrequenz (= 8 Durchgänge). In den Bedingungen in (d) wurden zwei Muster mit zwei Seiten der höheren Ortsfrequenz und zwei Seiten der höheren Geschwindigkeit gekreuzt (= 8 Durchgänge). Alle 40 Durchfahrten wurden in randomisierter Reihenfolge dargeboten, die die Versuchsteilnehmer in einem Versuchsblock ohne Pause absolvierten. Die Gesamtdauer des Experiments für jeden Teilnehmer betrug etwa ein halbe Stunde.

Ergebnisse

Jeweils einzelne Varianzanalysen für die vier im Methodenteil dargestellten Gruppen wurden auf die Positionsdaten gerechnet. In die Varianzanalysen ging jeweils die mittlere laterale Abweichung während der letzten zehn Sekunden bis zum Durchgangsende jeder Durchfahrt ein.

Kontrollbedingung

Erwartungsgemäß zeigte in den Kontrollbedingungen mit jeweils gleichen Ortfrequenzen und Wandgeschwindigkeiten kein Faktor eine signifikante Wirkung auf die mittlere gefahrene laterale Position (alle Faktoren $p > 0.05$, keine Interaktionen). Eine weitere Varianzanalyse auf der logarithmierten Standardabweichung der Position in der zweiten Hälfte jedes Durchgangs zeigte als einzigen Effekt den Einfluss des Faktors Geschwindigkeit, $F(1,9) = 9.46$, $p = 0.013$. Bei der niedrigen Geschwindigkeit von 1.43 m/s betrug die Standardabweichung 0.46 m (± 0.27 m) und wurde bei einer Geschwindigkeit von 2.86 m/s auf 0.66 m (± 0.46 m) erhöht. Tatsächlich liegen beide hier gemessenen Standardabweichungen zwischen den Werten, welche bei einer Geschwindigkeit von 0 und 10 m/s gemessen wurden (siehe Abbildung 2.7.)

Ungleiche Seitengeschwindigkeiten

Wenn das Streifen- oder Sinusmuster einer Wandseite mit der doppelten Geschwindigkeit gegenüber der anderen bewegt wurde, resultierten Fahrverläufe, wie sie in Abbildung 2.18. zu sehen sind. Dabei fällt auf, dass im Unterschied zu den bisherigen Beobachtungen, die Fahrer nach Durchgangsbeginn *zur* Seite mit der *höheren Wandgeschwindigkeit* lenkten, und nicht etwa von dieser weg. Nach einer maximalen Abweichung wurde anschließend wieder in Richtung Korridormitte korrigiert. Ferner scheint diese anfängliche Abweichung bei einem Streifenmuster stärker gewesen zu sein. Die Varianzanalyse jedoch bestätigte weder den Effekt des Zufahrens auf die Seite mit der höheren Wandgeschwindigkeit, $F(1,9) = 1.75$, $p > 0.05$,

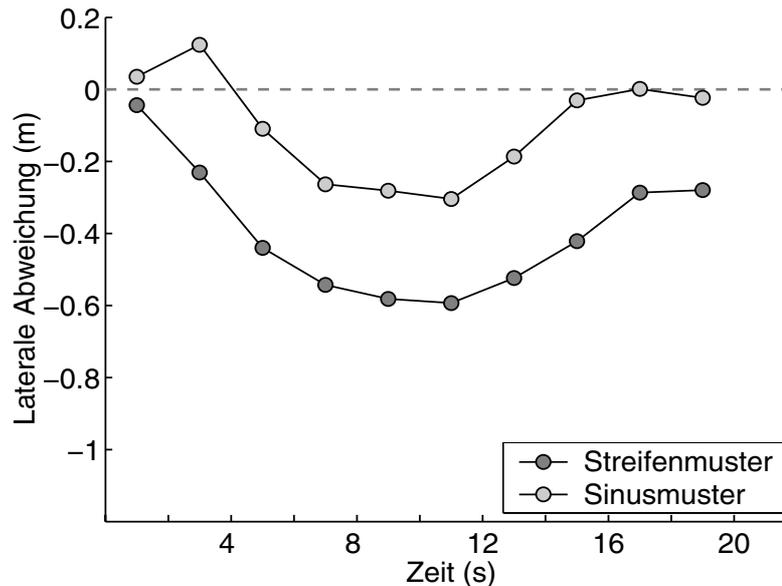


Abbildung 2.18. Effekt unterschiedlicher Wandgeschwindigkeiten. Man beachte, dass eine negative Abweichung von der Mitte zur Wand mit der höheren Bildgeschwindigkeit hinführt. Anders als im vorherigen Experiment, beobachtet man hier eine anfängliche Korrektur zur Seite mit der *höheren* Bildgeschwindigkeit und eine anschließende Rückführung in Richtung Korridormitte.

noch die Interaktion mit der Modulationsart des Musters, $F(1,9) < 1$. Die individuellen Abweichungen zeigen eine starke Variation zwischen den Fahrern (Abbildung 2.19.). Die Mehrzahl der Fahrer korrigierte zwar zur Seite mit der höheren Geschwindigkeit, es gab allerdings auch einige, die im Durchschnitt zur niedrigen Wandgeschwindigkeit steuerten. Diese Inkonsistenz zwischen den Fahrern ist sicherlich einer der Gründe, warum die lateralen Abweichungen in ihrer Gesamtheit sich im statistischen Sinn nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Als einziger Effekt wurde die Interaktion zwischen der Seite der höheren Geschwindigkeit und der verwendeten Ortsfrequenz signifikant, $F(1,9) = 4.52$, $p = 0.014$. Hatte das Wandmuster eine niedrige Ortsfrequenz (Wellenlänge 20 m), veränderten die Fahrer ihre Position um ca. 0.60 m zur Seite mit der höheren Geschwindigkeit, ohne dass danach eine deutliche Rückführung zur Korridormitte stattfand (Abbildung 2.20.).

Dagegen war bei einer hohen Ortsfrequenz (Wellenlänge 10 m) die anfängliche Abweichung weniger deutlich, und die anschließende Korrektur war ausgeprägter und ging über die Korridormitte hinaus. Daraus ergab sich während der zweiten Hälfte der Durchgänge im Durchschnitt nur eine geringe Abweichung von der Korridormitte bei hohen Ortsfrequenzen und eine hohe Abweichung bei niedrigen Ortsfrequenzen.

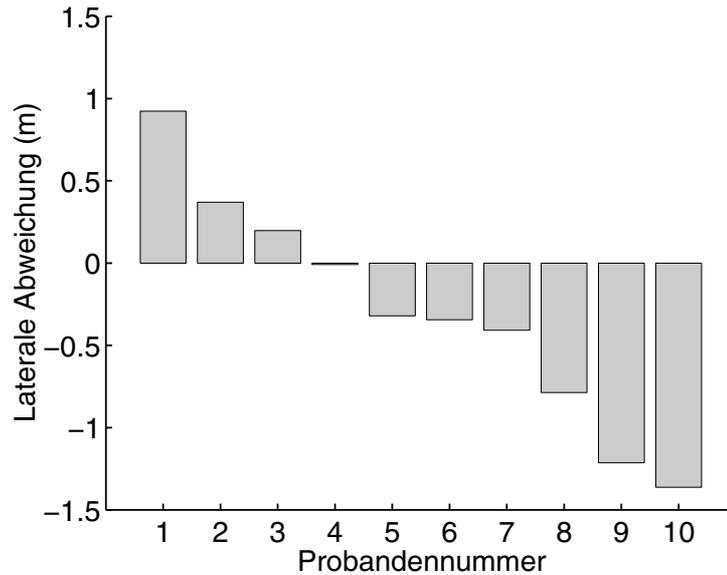


Abbildung 2.19. Individuelle mittlere Abweichungen von der Korridormitte bei unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten. Negative Abweichung gehen zur höheren Wandgeschwindigkeit.

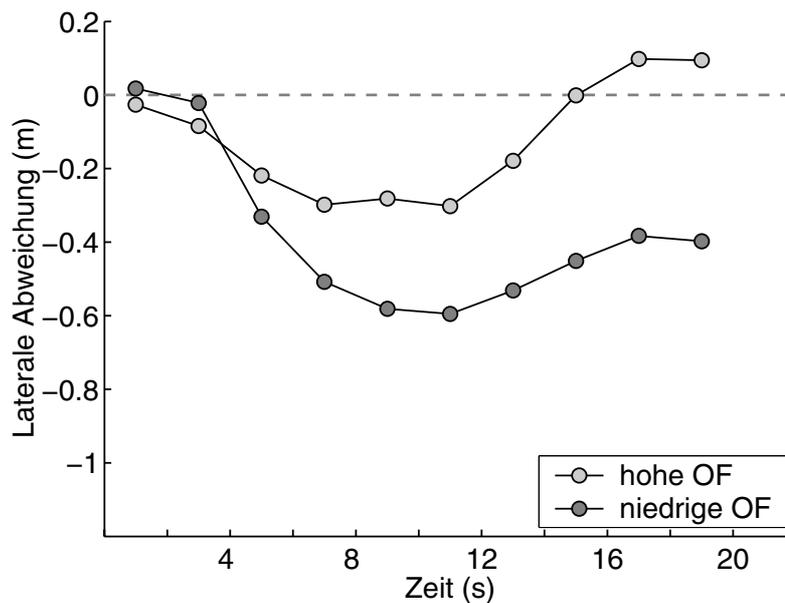


Abbildung 2.20. Effekt der zwei getesteten Ortsfrequenzen (OF) in den Durchgängen ungleicher Wandgeschwindigkeiten. Insgesamt bewegten sich die Fahrer zur Seite mit der höheren Wandgeschwindigkeit (entspricht einer negative Abweichung). Wenn das Wandmuster jedoch die höhere Ortsfrequenz trug, wurde diese Abweichung früher korrigiert.

Unterschiedliche Ortsfrequenzen

In den Durchgängen, in denen sich nur die Ortsfrequenz beider Wandseiten um das Zweifache unterschied, konnte unmittelbar nach Durchgangsbeginn eine Korrektur der lateralen Position zur Wandseite mit der höheren

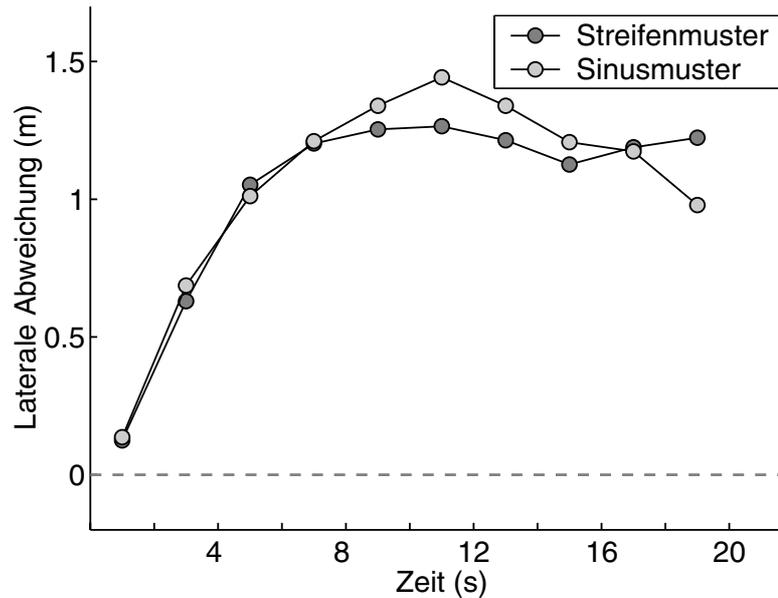


Abbildung 2.21. Effekt unterschiedlicher Ortsfrequenzen. Positive Abweichungen gehen in Richtung der höheren Ortsfrequenz. Man beobachtete relative starke Korrekturen zur Seite mit der höheren Ortsfrequenz, jedoch keinen Unterschied aufgrund der Art des Seitenwandmusters (Sinus- oder Streifenmuster).

Ortsfrequenz beobachtet werden (Abbildung 2.21.). Der Effekt der Richtung der höheren Ortsfrequenz ist hochsignifikant, $F(1,9) = 33.19$, $p < 0.001$. Kein weiterer Faktor oder Interaktion zwischen den Faktoren stellte sich als signifikant heraus (alle $p > 0.05$). Der nahezu identische zeitliche Verlauf der Abweichung zwischen dem Sinus- und dem Streifenmuster lässt den Schluss zu, dass die beiden Musterarten die gleiche Information für die Fahrer beinhalten.

Der Betrag der durchschnittlichen Abweichung in der Zeit von 10 bis 20 Sekunden belief sich auf 1.22 m. Bei dieser Abweichung wurden die Ortsfrequenzen zu 78.5% abgeglichen, also stärker als im vorigen Experiment (57%), bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten wirkte sich demnach die Differenz der Ortsfrequenzen stärker aus. Ein direkter Vergleich der durchschnittlichen Abweichung in diesem Experiment mit den Durchfahrten bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen im vorigen Experiment (Mittelwert von 0.83 m, ohne Seitenlinieninformation) konnte den nominellen Unterschied nicht bestätigen, $t(150) = 1.64$, $p = 0.051$.

Gleichzeitig unterschiedliche Ortsfrequenzen und Geschwindigkeiten

Der einzige signifikante Effekt betraf die Richtung der höheren Ortsfrequenz, $F(1,9) = 9.34$, $p = 0.014$. Knapp unterhalb der Signifikanzgrenze von 5% lag der Faktor Richtung der höheren Geschwindigkeit, $F(1,9) = 4.68$,

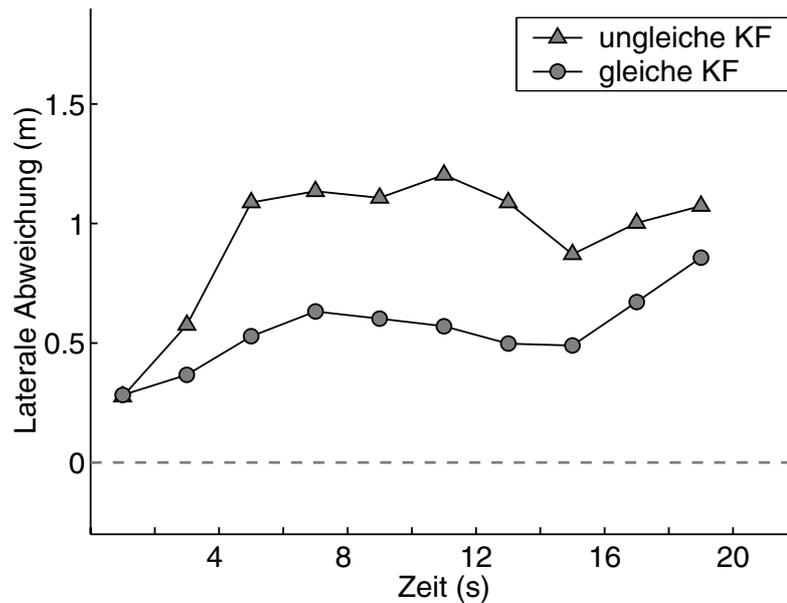


Abbildung 2.22. Laterale Abweichungen, wenn sich gleichzeitig Ortsfrequenz und Wandgeschwindigkeit auf beiden Seiten unterschieden. Positive Abweichungen gehen in die Richtung der höheren Ortsfrequenz. Zeitverläufe sind über Bedingungen mit Streifen- und Sinusmuster gemittelt worden. Der Zeitverlauf bei gleicher Kontrastfrequenz (KF) beider Seiten (d.h. hohe Ortsfrequenz gepaart mit niedriger Geschwindigkeit auf der einen Seite und der umgekehrte Fall auf der anderen Seite) zeigt, eine geringere Hinwendung zur höheren Ortsfrequenz, wenn diese Seite mit der niedrigeren Geschwindigkeit bewegt wurde (statistisch war der Unterschied jedoch nicht signifikant).

$p = 0.059$. Der Verlauf der Abweichung, wenn die Kombination von Ortsfrequenz und Geschwindigkeit in unterschiedlichen Kontrastfrequenzen resultierte (hohe Ortsfrequenz mit hoher Geschwindigkeit auf einer Seite), ist in Abbildung 2.22. dargestellt (dreieckige Symbole). In diesem Fall war die Abweichung konsistent mit den bisherigen Teilergebnissen in diesem Experiment, d.h. sowohl in Richtung der höheren Ortsfrequenz wie auch in Richtung der höheren Wandgeschwindigkeit. Im Fall gleicher Kontrastfrequenzen, d.h. wenn die höhere Ortsfrequenz mit der niedrigeren Geschwindigkeit bewegt wurde (Abbildung 2.22., runde Symbole), war die Abweichung von der Korridormitte geringer. Der Unterschied zwischen gleichen und ungleichen Kontrastfrequenzen war aber statistisch nicht signifikant ($p > 0.05$).

Zusammenfassung und Diskussion

Die Korrektur, die durch unterschiedliche Wandgeschwindigkeiten ausgelöst wurde, war gering. Unterschiedliche Wandgeschwindigkeit führten tendenziell dann auch eher dazu, zur Wandseite mit der höheren Geschwindigkeit zu korrigieren, wobei große interindividuelle Unterschiede beobachtet wurden. Die Tendenz zur Wand mit der höheren Wandgeschwindigkeit

zu fahren war ausgeprägter, wenn das Seitenwandmuster auf beiden Seiten eine niedrige Ortsfrequenz hatte. Unterschieden sich beide Wandseiten dagegen in der Ortsfrequenz, wurde eine starke Korrektur zur Wandseite mit der höheren Ortsfrequenz beobachtet. In keiner der Stimuluskombinationen lies sich ein Unterschied zwischen Sinus- und Streifenmuster feststellen. Die Variabilität in der lateralen Position zeigte schließlich eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Bei der höheren Geschwindigkeit wurden auch höhere Standardabweichungen beobachtet.

Im Vergleich zum vorherigen Experiment mit höheren Vorwärtsgeschwindigkeiten lautet das Hauptergebnis dieses Versuchs, dass die relative Gewichtung der untersuchten Hinweisreize sich ändern kann. Es scheint, dass die Höher der Vorwärtsgeschwindigkeit die relative Gewichtung der Informationsquellen beeinflussen kann. Bei niedrigen Geschwindigkeiten gewinnt die Ortsfrequenzinformation gegenüber der Geschwindigkeitsdifferenz an Bedeutung: Zum Einen waren die Korrekturen bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen stärker als bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zum anderen waren die Korrekturen jeweils zur Wand mit der höheren Ortsfrequenz gerichtet, in den Bedingungen, in denen direkt unterschiedliche Ortsfrequenzen mit unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten verglichen wurden. Im vorherigen Experiment (Vorwärtsgeschwindigkeiten von 10 und 20 m/s) dagegen konnten sich die Korrekturtendenzen aufgrund unterschiedlicher Ortsfrequenzen und unterschiedlicher Geschwindigkeiten aufheben. Es wurde dort auch eine frühe Dominanz der Geschwindigkeitsinformation beobachtet, die in diesem Experiment nicht festzustellen war. Möglicherweise war die dafür benötigte Korrekturtendenz aufgrund eines Geschwindigkeitsunterschieds auch einfach zu klein, um sichtbar zu werden.

Allein aufgrund dieses Experimentes kann nicht entschieden werden, auf welche Weise niedrigere Vorwärtsgeschwindigkeiten zu einer Verschiebung der Gewichtung der einzelnen Informationsquellen führten. In erster Linie wird dies dadurch verhindert, dass in diesem Experiment bei unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten qualitativ unterschiedliche Ergebnisse zum vorherigen Experiment erzielt wurden. Mögliche Gründe werden weiter unten diskutiert. Die Verschiebung der Gewichte muss dann notgedrungen an der relativ höheren Gewichtung des Musters der Seitenwände ansetzen. Der Befund, dass bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen stärkere Korrekturen zu beobachten waren als im vorigen Experiment, ist konsistent sowohl mit einer schlechteren Diskriminationsleistung für die langsameren Wandgeschwindigkeiten, wie auch mit einem besseren Signal-zu-Rauschen-Verhältnis der Ortsfrequenzinformation in Sinne der Hypothese der kontrollkorrelierten Aktivität. So kann eine schlechtere Diskrimination der

Wandgeschwindigkeiten dazu geführt haben, dass die Probanden während sie die Ortsfrequenzen abglichen, erst bei einem größeren lateralen Abstand von der Mitte bemerkten, dass das Geschwindigkeitsverhältnis der Seitenwände anfangs sich zu unterscheiden. In anderen Worten heißt das, die Probanden könnten den Konflikt später bemerkt haben. Der Befund kann aber auch ebenso bedeuten, dass die Wahrnehmung des Streifenmusters durch die niedrigere Geschwindigkeit im Vergleich zum vorherigen Experiment weniger beeinträchtigt wurde. Durch die niedrigen Vorwärtsgeschwindigkeit entstand auch eine niedrigere optische Aktivität, und dies kann für den Hinweisreiz Ortsfrequenz ein geringeres Rauschen dargestellt haben. Das kann das Streifenmuster als Informationsquelle möglicherweise in seiner Reliabilität aufgewertet haben. In Übereinstimmung mit dieser Interpretation ist auch die höhere Variabilität, die auftritt, wenn mit einer höheren Geschwindigkeit gefahren wurde.

Dass sich kein Unterschied zwischen Sinus- und Streifenmuster feststellen ließ, deutet darauf hin, dass der Beitrag des Seitenwandmusters für die Positionskontrolle nicht über deutlich sichtbare Kanten im Stimulus erfolgt. Das heißt, dass die Fahrer nicht einfach den Abstand von salienten Kanten abgeglichen haben. Wenn aber nicht die Kanten im Streifenmuster und ihr räumlicher Abstand zueinander für das Verhalten entscheidend sind, muss die Häufigkeit der Hell-Dunkel-Modulation in einem bestimmten Raumwinkel von Bedeutung sein, ein Größenverhältnis also, über das auch die Ortsfrequenz selbst definiert ist. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass man bei extrem reduzierten Helligkeits- oder Kontrastbedingungen Unterschiede zwischen Sinus- und Streifenmustern verzeichnen würde. (In Bezug auf die Studie von Duchon und Warren (2002), die nur einen geringen Einfluss durch ein unregelmäßiges, kontrastarmes Wandmusters fanden, scheint dies zu auch bedeuten, dass die Regelmäßigkeit des Musters statt klare Strukturen im Muster den Vergleich beider Wandseiten erleichtern.)

Wie kann die Beobachtung erklärt werden, dass eine Tendenz vorlag, zur schnelleren Seitenwand zu korrigieren? Zwei Erklärungsansätze sollen hier versucht werden. Der erste Ansatz spekuliert über den Bedeutung des Steuerinstrumentes und die maximal erreichbare laterale Geschwindigkeit, der Zweite versucht eine Erklärung in der Möglichkeit, dass eine Empfindung der Eigenrotation ausgelöst worden sein könnte.

In diesem wie auch im vorigen Experiment wurde die laterale Position mit der Auslenkung der Computermaus kontrolliert, die in beiden Fällen eine maximale seitliche Geschwindigkeit von 1.8 m/s erlaubte. Man kann nun vermuten, dass das Verhältniss von maximaler lateraler Geschwindigkeit zu der Vorwärtsgeschwindigkeit ein entscheidender Faktor für die qualitativ unterschiedlichen Ergebnisse beider Experimente sein könnte. Bewegt

sich ein Fahrer nämlich „irrtümlich“ zur Seite mit der höheren Wandgeschwindigkeit, wird *während der seitlichen Bewegung* die scheinbare Wandgeschwindigkeit dieser Seite *reduziert*, während die Wandgeschwindigkeit auf der anderen Seite erhöht wird. Je nach Verhältnis von lateraler zu longitudinaler Geschwindigkeit kann dabei auch ein umgekehrter Geschwindigkeitseindruck entstehen: Die eigentlich langsamere Wandseite erscheint nun als die schnellere. Eine Zeit lang könnte der Fahrer den Eindruck haben in Sinne der Abgleichstrategie das Richtige zu tun. Erst bei fortwährender Hinbewegung wird die Geschwindigkeit der Seite, auf die der Fahrer zusteuert, aufgrund des kleiner werdenden Abstands wieder ansteigen, so dass sich der Fahrer veranlasst fühlen könnte, Korrekturen in die Gegenrichtung vorzunehmen. In Abbildung 2.23. sind die Winkelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Höhe der lateralen Geschwindigkeit dargestellt, wenn zur Seite mit der höheren Wandgeschwindigkeit gesteuert wird. In der Berechnung wird angenommen, dass sich der Fahrer in der Mitte des Korridors, gleich weit von den Seitenwänden befindet. Ein formale Darstellung, die dieser Berechnung zugrunde liegt, findet sich in Anhang 2.

Man erkennt in der Abbildung 2.23., dass mit zunehmender lateralen Geschwindigkeit die Wand, auf die man zusteuert, langsamer erscheint (durchgezogene Linien), während die andere Seite sich schneller zu bewegen scheint (unterbrochene Linien). Bei den niedrigen Vorwärtsgeschwindigkeiten, wie in diesem Versuch, kreuzen sich beide Linien schon bei ca. 0.64 m/s, d.h. dass bei dieser lateralen Geschwindigkeit beide Wandseiten gleich schnell erscheinen. Bei den höheren Vorwärtsgeschwindigkeiten im vorigen Versuch dagegen kreuzen sich die Linien nicht. Die höchst mögliche seitliche Geschwindigkeit von 1.8 m/s, die das Steuerinstrument zulässt, reicht dazu nicht aus. Dieser Ansatz kann zwar eine Hinwendung bei niedrigen statt hohen Geschwindigkeiten erklären, nicht jedoch die deutlichere Abweichung bei niedrigen Ortsfrequenzen.

Ein weiterer Erklärungsansatz liegt darin, dass der visuelle Stimulus bei einigen Versuchspersonen die Empfindung einer Eigenrotation (zirkuläre Vektion) ausgelöst haben könnte (Dichgans & Brandt, 1978). Bei einer höheren Wandgeschwindigkeit auf der rechten Seite würde die Vektionsrichtung nach links zeigen. Sollte der Eindruck einer Eigenrotation vorgelegen haben, dann wäre es naheliegend anzunehmen, dass durch eine Annäherung zur schneller Seite eine Korrektur bzw. Kompensation dieses Eindrucks erreicht werden konnte. Das Auslösen der zirkulären Vektion gelingt besser mit Stimuli niedriger Ortsfrequenzen, vor allem wenn diese in der Peripherie präsentiert werden (Hu et al., 1997; Palmisano & Gillam, 1998). Dieser Befund ist konsistent mit der Beobachtung in diesem Experiment, dass eine Annäherung zur schnelleren Seite deutlicher bei niedrigen Ortsfrequenzen stattfand.

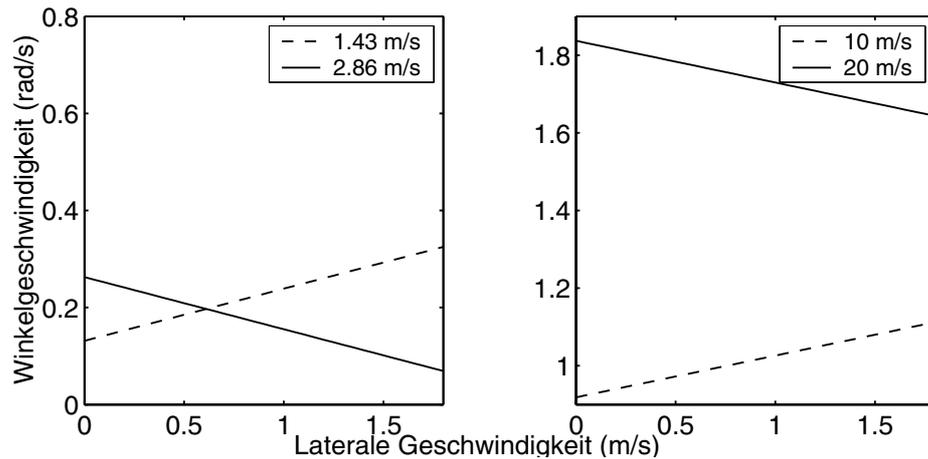


Abbildung 2.23. Vergleich der Winkelgeschwindigkeit beider Wände als Funktion der lateralen Geschwindigkeit. Die Werte beziehen sich jeweils auf einen Raumpunkt in einer Exzentrizität von 45° und einem gleichen Abstand zu beiden Seiten (5 m). Die laterale Bewegung ist in Richtung der höheren Wandgeschwindigkeit. Links: Parameter aus diesem Experiment. Bei einer lateralen Geschwindigkeit von ca. 0.64 m/s werden die Winkelgeschwindigkeiten während der seitlichen Bewegung ausgeglichen. Rechts: Vorheriges Experiment mit höheren Vorwärtsgeschwindigkeiten (10 und 20 m/s). Selbst bei der maximal erreichbaren lateralen Geschwindigkeit von 1.8 m/s, findet hier kein Ausgleich der Wandgeschwindigkeiten während der seitlichen Bewegung statt. Details zu dieser Berechnung sind in Anhang 2 zu finden.

Eine entsprechende visuelle Bewegung wird häufiger und mit einer kürzeren Latenz als zirkuläre Vektion empfunden, wenn niedrige Geschwindigkeit vorherrschen (Melcher & Henn, 1981). Dies dürfte erklären, warum der Effekt nur bei den niedrigen simulierten Geschwindigkeiten auftrat. Schließlich muss die zirkuläre Vektion als solche nicht unbedingt von den Fahrern wahrgenommen worden sein. Es wurde gezeigt, dass Kompensationsreaktionen einige Sekunden vor der Wahrnehmung der illusorischen Eigenrotation auftreten können (Previc & Mullen, 1990). Ob die Probanden während des Experimentes einen solchen Eindruck der Eigenrotation hatten, ist unklar. Keiner der Probanden berichtete von einer solchen Empfindung. Es muss aber auch hinzugefügt werden, dass beim nachexperimentellen Interview auch nicht explizit danach gefragt wurde. Aber selbst bei einer systematischen Erhebung der empfundenen zirkulären Vektion muss sich kein Zusammenhang mit dem entsprechenden Verhalten herausstellen. In Ausweitung der oben genannten Befunde ist es auch denkbar, dass eine Kompensationsreaktion nicht nur früher als die Wahrnehmung der Vektion erfolgt, sondern auch gänzlich unbemerkt geschehen könnte.

Gesamtdiskussion und offene Fragen

In allen bisher dargestellten Experimenten hatten die Fahrer die Aufgabe, die Mitte eines Korridors einzunehmen und zu halten - eine Aufgabe,

die durch einen Abgleich der Bildgeschwindigkeit und der Ortsfrequenzen im rechten und linken visuellen Halbfeld gelöst werden kann. Für einen Menschen, der sich zu Fuß entlang eines Ganges bewegt, stellt die Winkelgeschwindigkeit der Seitenwände somit einen nützlichen Hinweisreiz dar. Auf andere Aufgaben in der realen Umwelt kann diese Strategie nicht ohne weiteres übertragen werden. Beispielsweise sitzt ein Fahrer in der Regel nicht in der Mitte des Fahrzeugs, oder wenn man an einen Tunnel mit zwei Fahrspuren denkt, muss der Fahrer sein Fahrzeug in einem unterschiedlichen Abstand zu den Seitenwänden steuern. Eine einfache Abgleichstrategie würde hier nicht zu dem gewünschten Ergebnis führen. Daraus ergibt sich die Frage, ob die Bildgeschwindigkeit nur für eine Zentrierungsaufgabe genutzt werden kann, oder ob auch mit Hilfe der Bildgeschwindigkeit eine bestimmte Versetzung von der Korridormitte beibehalten werden kann, in dem ein bestimmtes *Verhältnis* der Bildgeschwindigkeiten angestrebt wird. Dazu könnte man in einem ähnlichen experimentellen Aufbau ermitteln, ob (a) Versuchspersonen beispielsweise die Aufgabe, in der Mitte der rechten Hälfte des Korridors zu fahren, auch ohne Seitenlinieninformationen reliabel erfüllen können, und (b) ob durch eine einseitige Erhöhung der Wandgeschwindigkeit sich obendrein eine systematische laterale Versetzung zeigt. Man müsste unter diesen Bedingungen allerdings auch eine höhere Variabilität tolerieren als in einer Zentrierungsaufgabe, da eine Referenz (das angestrebte Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten) memoriert werden muss, gegen die die aktuellen Wandgeschwindigkeiten verglichen werden müssten. Bei einer einfachen Zentrierung ist eine solche Gedächtnisleistung nicht notwendig.

Es zeigte sich im ersten Experiment, dass Seitenlinien, wie kaum anders zu erwarten, eine bedeutsame Informationsquelle zur Spurhaltung darstellen, auch wenn sie die Effekte, die durch unterschiedliche Ortsfrequenzen oder unterschiedliche Geschwindigkeit entstanden, nicht vollständig eliminieren konnten. Es stellt sich die Frage, inwieweit der verhältnismäßig starke Einfluss der Seitenlinien daher rührt, dass die Seitenlinien in den einzelnen Durchgängen entweder vorhanden oder nicht vorhanden waren, und im Unterschied zu den Ortsfrequenzen und der Geschwindigkeit, nicht parametrisch variiert wurden. Die Variation der Ortsfrequenz und Geschwindigkeit kann während des experimentellen Verlaufs dazu geführt haben, dass diese zwei Hinweisreize von den Fahrern als weniger zuverlässig bewertet wurden, und die Seitenlinieninformation relativ dazu an Einfluss gewinnen konnte. Um die Seitenlinieninformation mit den anderen Informationsquellen vergleichbarer zu machen, und so eine möglicherweise geringere Gewichtung der Seitenlinieninformation zu untersuchen, könnte man die Fahrleistungen vergleichen, wenn (a) die Seitenlinien in einem unterschiedlichen Abstand zur Augenhöhe des Betrachters liegen und (b)

einzelne Seitenlinien innerhalb eines Durchgangs in unterschiedlichem vertikalen Abstand zum Betrachter präsentiert werden. Das letztgenannte würde dann den Konfliktbedingungen mit unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten und Ortsfrequenzen entsprechen.

Bei niedrigen ungleichen Wandgeschwindigkeiten führen die Versuchspersonen anfänglich zur Seite mit der höheren Bildgeschwindigkeit, und korrigierten nachfolgend wieder zur Mitte des Korridors. Offen ist, ob durch Verlängerung der Beobachtungsdauer (> 20 s), sich der gleiche Effekt wie bei höheren Vorwärtsgeschwindigkeiten eingestellt hätte, nämlich eine Korrektur zur Seite mit der niedrigeren Geschwindigkeit. Durch eine Beschränkung der lateralen Geschwindigkeit auf niedrigere Maximalwerte könnte man vielleicht entscheiden, ob der Eindruck der zirkulären Vektion oder das hohe Verhältnis zwischen der seitlichen Maximal- und vorwärtsgerichteten Geschwindigkeit für das Zusteuern zur Seite mit der höheren Geschwindigkeit verantwortlich ist. Sollte sich herausstellen, dass bei sehr niedrigen Vorwärtsgeschwindigkeiten tatsächlich ein Eindruck einer Eigenrotation (oder besser gesagt einer kurvilinearen Bewegung) auftritt, würden sich weitere Fragen nach den spezifischen Bedingungen ergeben (Kontrast, Ortsfrequenz, Geschwindigkeitsunterschied, Tiefencues u.s.w.). Meines Wissens ist der Übergang von einer linearen zu einer kurvilinearen Vektion noch nicht untersucht worden, und einen solchen Übergang nur durch Änderung eines einzigen Parameters erscheint durchaus denkbar. Sauvan und Bonnet (1995) konnten beispielsweise eine kurvilineare Vektion auslösen mit Hilfe zweier Bildschirme, die in einem Winkel von 120° zum Beobachter postiert waren, und auf denen zweidimensionale Streifenmuster mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zu sehen waren. Aufgrund dieser Befunde sollte man dann erwarten, dass, indem man mehr und mehr vom zentralen Blickfeld abdeckt, die Beobachter die ungleich schnelle Bewegung der Seitenwände des Korridors irgendwann nicht mehr als eine geradlinige Bewegung, sondern als eine kurvige Fahrt wahrnehmen.

In allen Experimenten nahm der Korridor ein Blickfeld von 180° ein, und die Größe des Blickfeldes wurde in dieser Studie nicht systematisch verändert. Es ist naheliegend danach zu fragen, ob alle Bereiche des Gesichtsfeldes für die Wahrnehmung und den Abgleich der Geschwindigkeiten eine gleich wichtige Rolle spielen, oder ob bestimmte Bereiche eher genutzt werden. Die Experimente von Duchon und Warren (2002) zeigen, dass ein horizontales Gesichtsfeld von bereits 40° ausreicht, um vergleichbare Resultate mit den hier beschriebenen Ergebnissen zu erzielen. Sie legen damit nahe, dass der zentrale Blickbereich für das Kontrollverhalten zumindest hinreichend ist. Ob durch Hinzunahme exzentrischer Bereiche die Performanz der Fahrer erhöht werden kann, oder das Zentrum und die Peripherie des visu-

ellen Feldes für die Aufnahme und Verarbeitung der Geschwindigkeitsinformation jeweils andere Aufgaben erfüllen als bei der Verarbeitung der Ortsfrequenzinformation, ist unklar.

In Beziehung dazu steht die Frage, ob die Geschwindigkeitsinformation über einen größeren Bereich integriert wird, beispielsweise indem die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit im linken und rechten Halbfeld bestimmt und verglichen wird, oder ob die Geschwindigkeitsinformation lokal, an distinkten Stellen entnommen wird. Zu den distinkten Stellen im visuellen Feld könnten Bereiche mit einer mittleren Exzentrizität zur jeweiligen Seite zählen, Bereiche, an denen die größte Geschwindigkeit vorliegt (in einer solchen Fahraufgabe gleichbedeutend mit den exzentrischsten Stellen), oder retinale Bereiche, die für die gegebenen Geschwindigkeiten die niedrigsten Wahrnehmungsschwellen besitzen.

Um auf das eingangs vorgestellte Alltagsbeispiel zurück zu kommen (Abbildung 2.2.), das eine Szene zeigt, in der unterschiedliche Geschwindigkeiten zwischen beiden Bildhälften vorliegen, kann man aufgrund der hier vorgestellten Ergebnisse erwarten, dass man in einer solchen Verkehrssituation durchaus eine systematische Reaktion der Fahrer beobachten könnte. Die Ergebnisse legen aber auch nahe, dass eine systematische Positionskorrektur der Fahrer recht klein ausfallen kann, da normalerweise auch weitere Hinweisreize zur Verfügung stehen und die Fahrer nicht nur einen Abgleich der Bildgeschwindigkeiten vornehmen. Ob eine solche Korrekturbewegung zur Seite eines anderen Fahrzeugs stattfindet, und dass dabei auch weitere Faktoren zu berücksichtigen sind, ist auch Gegenstand des letzten Kapitels (Kapitel 7).

GESCHWINDIGKEITSWAHRNEHMUNG UND STRUKTUR DES STIMULUS

Das folgende Kapitel baut auf den Befunden des Bientunnel-Experiments (Kapitel 2) auf, in dem gezeigt wurde, dass die Bewegung entlang eines Korridors durch einen Abgleich der Winkelgeschwindigkeiten kontrolliert werden kann. Die dazu notwendige Unterscheidungsleistung, die diese Strategie voraussetzt, wird hier mit der klassischen psychophysischen Methode der konstanten Stimuli untersucht. Neben der Güte der Diskrimination bei unterschiedlich hohen Geschwindigkeiten (Exp. 1), interessierte hier auch eine mögliche Beeinflussung der Geschwindigkeit durch eine Veränderung der Ortsfrequenz des Wandmusters (Exp. 2). Die Ergebnisse des ersten Experiments zeigen, dass bei einer schnellen Vorwärtsgeschwindigkeit von 20 m/s Geschwindigkeiten besser unterschieden werden können, als bei einer langsameren Vorwärtsgeschwindigkeit von 10 m/s, unabhängig von der Ortsfrequenz des Wandmusters. Die Ergebnisse des zweiten Experiments zeigen eine deutliche Erhöhung der wahrgenommenen Geschwindigkeit, wenn die Ortsfrequenz verdoppelt wird, ohne dass sich dabei die Diskriminationsleistung verändert. Ferner lassen sich zwischen der Diskriminationsleistung der Probanden und ihren Fahrleistungen im Bientunnel systematische Zusammenhänge aufzeigen.

Geschwindigkeitswahrnehmung

Die wahrgenommene Geschwindigkeit ist eine unbeständige visuelle Empfindung. Sie ist abhängig von einer Reihe von Parametern und Kontexteffekten. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen wurden schon in frühen Jahren des letzten Jahrhunderts dazu durchgeführt (z.B. Brown, 1931). Die wahrgenommene Geschwindigkeit zeigt beispielsweise bei fortwährender Bewegung starke Adaptationseffekte (z.B. Hammett, Thompson, & Bedingham, 2000; Smith, 1987), wie man sie von einer schnellen Autobahnfahrt her kennt, wenn die anschließende langsamere Fahrt nach der Aus-

fahrt wie im Schneckentempo erscheint. Bewegung, und damit auch Geschwindigkeit eines Objektes, kann erfahren werden, auch ohne dass eine reale Bewegung des Objektes existiert, wie im Beispiel der induzierten Bewegung: Ein eigentlich stationäres Objekt scheint sich zu bewegen, wenn es vor einem bewegten Hintergrund liegt.

Eine gut untersuchte Einflussgröße auf die Wahrnehmung der Geschwindigkeit ist die des Stimuluskontrasts. Die wahrgenommene Geschwindigkeit wird bei niedrigem Kontrast reduziert, wobei niedrige physikalische Geschwindigkeiten stärker vom Kontrasteffekt betroffen sind (Blakemore & Snowden, 1999; Distler, 2000; Gegenfurtner & Hawken, 1996; Hawken, Gegenfurtner, & Tang, 1994; Snowden, Stimpson, & Ruddle, 1998; Stone & Thompson, 1992). Diese Kontrastabhängigkeit kann aber auch verringert werden, wenn die Bewegung eines Objektes vor einem texturierten Hintergrund stattfindet (Blakemore & Snowden, 2000). Die Kontrastabhängigkeit der subjektiven Geschwindigkeit wurde dann auch für erhöhte Fahrgeschwindigkeiten bei Nebel verantwortlich gemacht (Blakemore & Snowden, 1999). Die Geschwindigkeit wird auch reduziert empfunden, wenn solche Helligkeitsbedingungen herrschen, dass die Bewegungswahrnehmung nur über die lichtempfindlicheren Stäbchen vermittelt wird (Gegenfurtner, Mayser, & Sharpe, 1999).

Eine weitere mögliche Beeinflussung der Geschwindigkeitswahrnehmung, die seit geraumer Zeit diskutiert wird, bezieht sich auf die räumliche Struktur des Stimulus (Chen, Bedell, & Frishman, 1998; Diener et al., 1976; McKee et al., 1986; Reisbeck & Gegenfurtner, 1999; Smith & Edgar, 1990; Smith & Edgar, 1991). Betrachtet man die physikalische Geschwindigkeit eines Stimulus im Frequenzbereich, dann wird die Geschwindigkeit durch den Quotienten aus der Kontrastfrequenz (KF) und der Ortsfrequenz (OF) des Stimulus bestimmt:

$$\text{Winkelgeschwindigkeit} \left(\frac{\text{deg}}{\text{s}} \right) = \frac{\text{Kontrastfrequenz} \left(\frac{c}{\text{s}} \right)}{\text{Ortsfrequenz} \left(\frac{c}{\text{deg}} \right)}$$

Wobei mit c die Periode (cycle) gekennzeichnet wird. Bei einer gegebenen Ortsfrequenz, bedeutet eine Erhöhung der Geschwindigkeit auch notwendigerweise eine Erhöhung der Kontrastfrequenz, d.h. beide Größen sind voneinander nicht unabhängig. Wenn andererseits zwei Stimuli mit unterschiedlicher Ortsfrequenz vorliegen, die sich jedoch mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen, werden unterschiedlicher Kontrastfrequenzen erzeugt. Ein Mechanismus, der nicht Geschwindigkeit an sich messen kann, sondern für die Bestimmung der Geschwindigkeit die Kontrastfrequenz her-

anzieht, würde dann signalisieren, dass sich beide Stimuli unterschiedlich schnell bewegen. Diese mögliche Abhängigkeit einer Geschwindigkeitswahrnehmung von der dabei auftretenden Kontrastfrequenz, bzw. äquivalent dazu, von der Ortsfrequenz des Stimulus, soll im Weiteren einfach als *Frequenzeffekt* bezeichnet werden.

Warum sollte ein Frequenzeffekt erwartet werden?

Es existiert eine Reihe von Befunden, aufgrund derer ein Frequenzeffekt bei der Geschwindigkeitswahrnehmung zu erwarten ist. Einige dieser Befunde stammen aus Untersuchungen zum visuomotorischen System der Fliege. Diese Untersuchungen zeigen, dass die optomotorische Reaktion der Fliege von der Kontrastfrequenz eines bewegten Musters abhängt und nicht von der Geschwindigkeit. Einige weitere Befunde stammen aus Untersuchungen, die sich allgemein mit der Frage befassen, ob im menschlichen Gehirn geschwindigkeitssensitive Mechanismen existieren. Die Frage, die alle gemeinsam haben ist, mit welcher neuronalen Verschaltung Bewegung detektiert werden kann und wie in höheren Stufen diese Information weiterverarbeitet werden kann, damit zum Beispiel ein komplexes Bewegungsmuster oder die Geschwindigkeit des Stimulus kodieren werden kann. Die zu Grunde liegenden Ansätze dieser zwei Befundklassen sollen im Folgenden kurz skizziert werden.

Geht man davon aus, dass die Bewegungsdetektion auf dem theoretischen Prinzip eines Reichardt-Detektors beruht (Hassenstein & Reichardt, 1956; Reichardt, 1961), dann hängt die Antwort auf die Bewegung eines Musters von dem Abstand der paarigen Sensoren (Δs) und der zeitlichen Verzögerung (Δt) im System ab (Abbildung 3.1.a). Für einen solchen, sogenannten elementaren Bewegungsdetektor gilt, dass er bei einer bestimmten Ortsfrequenz-Kontrastfrequenz-Kombination maximal antwortet (Götz, 1964). Das bedeutet auch, dass die stärkste Antwort mit zunehmender Ortsfrequenz des Stimulus in Richtung niedrigerer Geschwindigkeiten verschoben wird. Es hat sich herausgestellt, dass das Modell eines elementaren Bewegungsdetektors sehr gut geeignet ist, um die sogenannte optomotorische Reaktion von Insekten zu erklären. Danach reagieren Fliegen auf eine globale visuelle Bewegung der Umgebung mit einer Rotation in die gleiche Richtung. Durch diese Reaktion können Fliegen ihre Flugrichtung stabilisieren, wenn beispielsweise Verdrehungen durch Luftstöße auftreten oder die Flügel nicht symmetrisch schlagen. Die optomotorische Reaktion richtet sich nach der Kontrastfrequenz der Umgebung - und genau diese Eigenschaft zeigt auch der elementare Bewegungsdetektor: Die maximale Antwort findet bei einer bestimmten Kontrastfrequenz statt (siehe Abbildung 3.1.c). Dass die optomotorische Reaktion von der Kontrastfrequenz abhängt, hat den Vorteil, dass die Fliege dadurch schnell aber auch akkurat auf Störungen

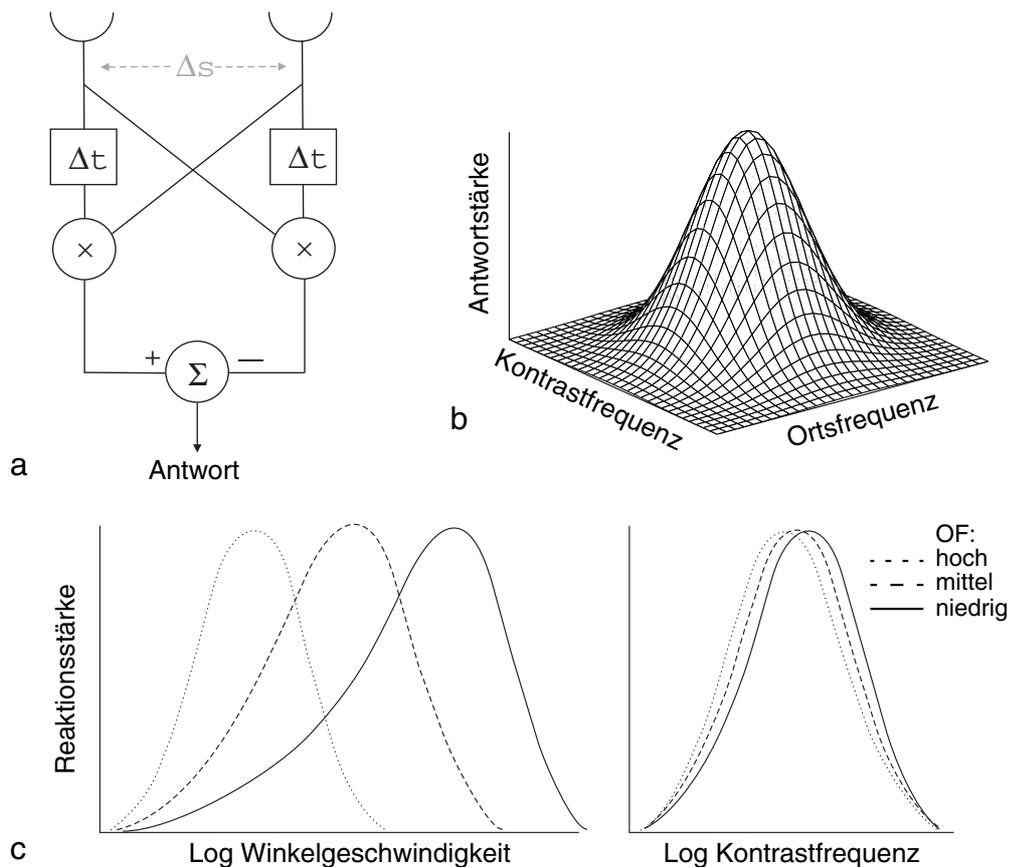


Abbildung 3.1. Modell eines elementaren Bewegungsdetektors und dessen Abhängigkeit von der Kontrastfrequenz. a: Das Modell des Reichardt-Detektors. Paarige Sensoren im Abstand Δs registrieren die Helligkeit eines Stimulus und leiten sie auf zwei getrennten Wegen weiter, wovon auf einem der Wege das Signal eine Verzögerung Δt erfährt (durch zeitliche Tiefpass-Filterung). In einer Korrelationsstufe wird das verzögerte Signal des einen Sensors mit dem unverzögerten Signal des anderen Sensors korreliert. In einer letzten Stufe wird die Richtung der Bewegung ermittelt, indem die Ergebnisse beider Korrelationen mit entgegengesetzten Vorzeichen summiert werden. b: Räumlich-zeitliche Frequenzantwortfunktion. Die maximale Antwort eines Reichardt-Detektors liegt bei einer bestimmten Ortsfrequenz-Kontrastfrequenz-Kombination. c: Normalisierte Stärke der optomotorischen Reaktion der Fliege. Mit zunehmender Ortsfrequenz des Stimulus verringert sich die optimale Stimulusgeschwindigkeit mit der eine maximale Reaktion erreicht wird. Die Reaktionskurven bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen überlagern sich, wenn die Stärke der optomotorischen Reaktion über der Kontrastfrequenz des Stimulus aufgetragen wird.

reagieren kann. Die Schnelligkeit wird durch einen hohen Verstärkungsfaktor (Gain) zwischen dem Korrektursignal und der motorischen Antwort garantiert, ohne dass dabei das Gesamtsystem Gefahr läuft instabil zu werden, wie es normalerweise bei hohen Verstärkungsfaktoren geschieht (Warzecha & Egelhaaf, 1996).

Dem zweiten Ansatz für einen Frequenzeffekt liegt zugrunde, dass das visuelle System räumliche und zeitliche Information durch Mechanismen verarbeitet, die ihrerseits auf bestimmte Orts- und Kontrastfrequenzen opti-

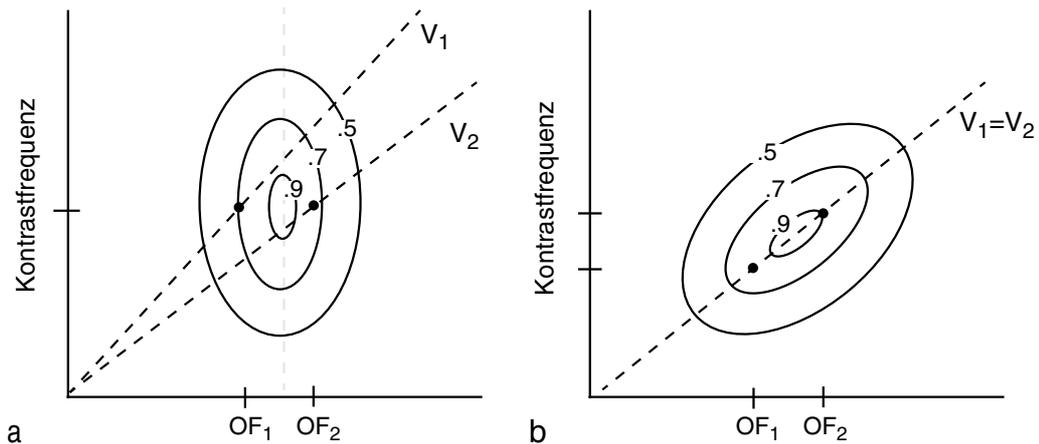


Abbildung 3.2. Schematische, räumlich-zeitliche Antwortfunktion eines Mechanismus oder einer Zelle, die Kontrastfrequenz (KF) und Ortsfrequenz (OF) separierbar (a) oder nicht separierbar (b) enkodieren. Die Ellipsen geben Bereiche gleicher Antwortstärke an (zum Antwortmaximum normiert). In (a) sind die Hauptachsen der Antwortfunktion jeweils parallel zur Ordinate und Abszisse (große Hauptachse grau gestrichelt). Zwei unterschiedliche OFn (OF_1 und OF_2) erzielen ein Antwortmaximum bei gleicher KF. Die korrespondierenden Geschwindigkeiten unterscheiden sich (schwarze gestrichelte Linie; $V_1 > V_2$). In (b) ist ein Mechanismus dargestellt, der geschwindigkeitssensitiv antwortet. Hier ist die Hauptachse der konzentrischen Ellipsen geneigt. Die zwei OFn lösen ein Antwortmaximum bei zwei unterschiedlichen KF aus, die jedoch die gleiche Geschwindigkeit spezifizieren (schwarze gestrichelte Linie; $V_1 = V_2$). Dieser Mechanismus wird umso stärker antworten, je stärker die Geschwindigkeit mit seiner Vorzugsgeschwindigkeit übereinstimmt.

mal eingestellt („getunt“) sind. Das heißt, solche Mechanismen reagieren auf bestimmte Frequenzen mit einer maximalen Antwort (siehe z.B. De Valois & De Valois, 1988). Eine solche räumlich-zeitliche Antwortfunktion ist schematisch in Abbildung 3.2.a dargestellt, und sie könnte als ein rezeptives Feld einer Zelle im primären visuellen Kortex betrachtet werden (man beachte die Ähnlichkeit zur Antwortfunktion eines elementaren Bewegungsdetektors in Abbildung 3.1.b). Die Antwortfunktion hat zwar ein Maximum bei einer bestimmten Geschwindigkeit, doch ein solcher Mechanismus ist nicht geschwindigkeitssensitiv. Dass dieser Mechanismus bei einer bestimmten Geschwindigkeit am stärksten antwortet, ist vielmehr ein Nebenprodukt davon, dass er bei einer bestimmten Kombination von Orts- und Kontrastfrequenz maximal reagiert. Wenn die selbe Geschwindigkeit durch eine andere Kombination von Orts- und Kontrastfrequenzen erreicht wird (Punkte entlang der schwarzen, gestrichelten Linie in Abbildung 3.2.a), ändert sich auch die Antwort dieses Mechanismus. Man spricht in diesem Fall von einem „separierbaren“ Mechanismus: Die optimale Ortsfrequenz hängt nicht von der Kontrastfrequenz des präsentierten Stimulus ab, und umgekehrt. Physiologische Messungen haben ergeben, dass die Antwortstärke der meisten Neurone im primären visuellen Kortex tatsächlich von der Kontrastfrequenz des Stimulus abhängt und ihre Antwortfunktion im

Frequenzdiagramm der schematischen Darstellung in Abbildung 3.2.a entspricht. Dass solche Neurone nicht geschwindigkeitssensitiv sind, lässt sich auch damit verdeutlichen, dass sie ein bewegtes Muster auch nicht benötigen. Eine Antwort lässt sich auch mit stationären, aber dafür flickernden Stimuli auslösen (De Valois & De Valois, 1988).

Die Antwortfunktion eines geschwindigkeitssensitiven Mechanismus ist in Abbildung 3.2.b dargestellt. Im Unterschied zur Antwortfunktion eines nicht geschwindigkeitssensitiven Mechanismus ist hier die große Hauptachse im Frequenzdiagramm geneigt, wobei ihre Steigung der Geschwindigkeit entspricht. Ein solcher Mechanismus antwortet umso stärker, je mehr die Stimulusgeschwindigkeit der bevorzugten Geschwindigkeit ähnelt. Dieser Mechanismus wird als „nicht-separierbar“ bezeichnet, da nun die optimale Ortsfrequenz nicht unabhängig von der Kontrastfrequenz ist, sondern mit einer höheren Ortsfrequenz auch eine höhere Kontrastfrequenz einhergehen muss. Würde die Geschwindigkeit durch einen solchen Mechanismus vermittelt werden, würde man nicht erwarten, dass sich die subjektiv wahrgenommene Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz ändert.

Um eine potentielle Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Kontrast- bzw. Ortsfrequenz nochmal zu illustrieren, ganz abgesehen davon, wie die Kodierung zu Stande kommen könnte, kann man ein extremes Beispiel heranziehen. Man stelle sich einen Stimulus vor, der mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt wird. Nun wird die Ortsfrequenz des Stimulus soweit erhöht, dass die Kontrastfrequenz jenseits der Flimmerverschmelzungsfrequenz liegt. An dieser Stelle wird ein Punkt erreicht, bei dem die Kontrastfrequenz nicht mehr wahrgenommen werden kann. Bei einem solchen Stimulus ist es dann auch nicht möglich, die Richtung der Bewegung anzugeben, ganz abgesehen davon welche Geschwindigkeit der Stimulus hat.

Experimentelle Evidenz für oder gegen einen Frequenzeffekt.

In der Vergangenheit wurde getrennt zwischen einer Beeinflussung der *Geschwindigkeitsdiskrimination* und einer Beeinflussung der *wahrgenommenen Geschwindigkeit*. In den Experimenten zur Diskriminationsfähigkeit interessierte, wie weit die Geschwindigkeit eines Vergleichsstimulus gegenüber einem Referenzstimulus erhöht oder erniedrigt werden muss, um eine gewisse Unterscheidungsfähigkeit zu erreichen. Wenn die wahrgenommene Geschwindigkeit bestimmt werden sollte, wurde dagegen gewöhnlich die Geschwindigkeit des Vergleichsstimulus so eingestellt, dass sie mit der Geschwindigkeit einer Referenz übereinstimmte.

Durch zufällige Variation der Ortsfrequenz eines sinusoidalen Streifenmusters wurde gezeigt, dass die Diskriminationsschwellen für Geschwin-

digkeit sich nicht ändern, und die Diskriminationsleistung dabei besser ist, wenn die Geschwindigkeit und nicht die Kontrastfrequenz diskriminiert werden muss (McKee et al., 1986). McKee et al. sehen darin einen Beleg dafür, dass Geschwindigkeit direkt wahrgenommen wird, und nicht von Kontrast- und Ortsfrequenz abhängt. Die Kontrastfrequenz dagegen ist eine indirekte Größe, die aus Geschwindigkeit und Ortsfrequenz inferiert werden muss. Es existieren aber auch dazu gegensätzliche Befunde, die zeigen, dass die Diskrimination von Kontrastfrequenzen nicht unbedingt schlechter ist als die Diskrimination von Geschwindigkeiten, und dass die Befunde von McKee nur bei niedrigen Geschwindigkeiten (bis zu 5 °/s) gelten (Smith & Edgar, 1991). Bei höheren Geschwindigkeiten wurde eine Verschlechterung der Diskriminationsleistung beobachtet (Erhöhung der Weber-Quotienten), wenn die Ortsfrequenz des Stimulus verändert wurde. In einem weiteren Experiment, in dem die Geschwindigkeiten von Streifenmuster unterschiedlicher Ortsfrequenzen *eingestellt* werden musste, beobachtete man einen Frequenzeffekt ebenfalls nur bei höheren Geschwindigkeiten. Streifenmuster mit einer höheren Ortsfrequenz benötigten dabei eine höhere Geschwindigkeit (!), um als gleich schnell wie der Vergleichsreiz wahrgenommen zu werden. Bei niedrigen Geschwindigkeiten dagegen zeigt sich kein Frequenzeffekt (Smith & Edgar, 1990).

In der jüngsten Studie schließlich berichteten Chen, Bedell und Frishman (1998), dass sich die Güte der Geschwindigkeitsdiskrimination selbst bei höheren Geschwindigkeiten nicht änderte, wenn Muster mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen verglichen wurden (Chen et al., 1998). Sie fanden allerdings einen Frequenzeffekt, wenn der Punkt subjektiver Gleichheit beider Geschwindigkeiten herangezogen wurde. Anders als bei den Befunden von Smith (1990), erschien ein Muster mit einer höheren Ortsfrequenz als schneller. Bei einer Verdopplung der Ortsfrequenz eines Musters, wurde die wahrgenommene Geschwindigkeit um ca. 14% erhöht (Chen et al., 1998). Dass der Frequenzeffekt in der wahrgenommenen Geschwindigkeit, aber nicht in der Diskrimination zu beobachten ist, erklären Chen und Mitarbeiter mit der Möglichkeit, dass entweder unterschiedliche Kodierungsprinzipien für Wahrnehmung und Diskrimination verantwortlich sind, oder dass die Wahrnehmung und die Diskrimination von Geschwindigkeiten nicht auf der gleichen Verarbeitungsstufe stattfinden.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die experimentellen Befunde für oder gegen einen Frequenzeffekt sehr uneinheitlich sind und weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Debatten. Ferner deutet sich in jüngeren Arbeiten die interessante Möglichkeit einer Dissoziation zwischen wahrgenommener Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsdiskrimination an. Sollte diese Dissoziation auch in Zukunft bestätigt werden, hätte dies

Konsequenzen vor allem bezüglich der methodischen Herangehensweise wie Geschwindigkeitswahrnehmung experimentell zu untersuchen ist.

Wahrnehmung der Geschwindigkeit bei Eigenbewegung

Bei den bisher zitierten Arbeiten, wurde ein bewegter Stimulus einem stationären Beobachter präsentiert. Einige Arbeiten beschäftigten sich mit der Frage, ob die wahrgenommene Geschwindigkeit während der Eigenbewegung des Beobachters von der Struktur der Umgebung abhängt. Die meisten Arbeiten hierzu simulierten allerdings die Eigenbewegung des Beobachters.

Für die Geschwindigkeitswahrnehmung über einem flachen Terrain wurden zwei optische Größen vorgeschlagen: Die *globale optische Flussrate* (global optical flow rate) und die *optische Kantenrate* (optical edge rate) (Larish & Flach, 1990; Warren, 1982). Die globale optische Flussrate ist die Vorwärtsgeschwindigkeit, welche in Augenhöhen des Betrachters pro Sekunde ausgedrückt wird, und die Kantenrate ist die Frequenz mit der lokale Diskontinuitäten in der Umgebung einen Referenzpunkt im visuellen Feld passieren. Verdoppelt man beispielsweise den Abstand zu einer Ebene, halbiert sich die globale optische Flussrate - dies ist der Grund warum bei Flügen in niedriger Höhe eine größere Geschwindigkeit erfahren wird als in großer Höhe. Die Kantenrate ist abhängig (a) von der Struktur der Umgebung und (b) von der Fahrgeschwindigkeit. Fährt man beispielsweise durch eine Allee, dann kann sich die Kantenrate darauf beziehen, wie oft pro Zeiteinheit ein Baum passiert wird. Die Kantenrate wird dementsprechend erhöht, wenn die Bäume dichter stehen oder wenn die Geschwindigkeit erhöht wird. Insofern ähnelt das Konzept der Kantenrate dem der Kontrastfrequenz, mit dem Unterschied, dass sich die Kantenrate eher auf saliente Objekte in der Umgebung mit einem starken Kontrast bezieht. Anders als die optische Flussrate ist die Kantenrate von der Texturierung der Oberfläche abhängig. Häufige Kanten senkrecht zur Bewegungsrichtung (senkrecht Texturmuster) haben eine hohe Kantenrate, Kanten parallel zur Bewegungsrichtung (paralleles Texturmuster) haben keine Kantenrate.

Larish und Flach (1990) verglichen unterschiedliche Texturen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Geschwindigkeitswahrnehmung. Mit Hilfe des Verfahrens der numerischen Größenschätzung fanden sie, dass Kantenrate und Flussrate zur Geschwindigkeitsschätzung in additiver Weise verwendet werden, wobei die Kantenrate den größeren Beitrag lieferte. Der Beitrag der globalen optischen Flussrate konnte jedoch auch erhöht werden, wenn, statt eines kleinen Blickfeldes von nur 7°, ein Blickfeld von 42° verwendet wurde (Larish & Flach, 1990). Wie erwähnt, hängt die Kantenrate auch von der Dichte der Kanten in der Umgebung ab. Würde man dann mit

einer Erhöhung der Kantendichte auch eine höhere wahrgenommene Geschwindigkeit erwarten, so wie in Einzelfällen dies mit Sinusmustern in der Frontalebene gezeigt wurde? Eine alltagsrelevante Umsetzung eines solchen Effekts, wäre die Möglichkeit mit quer zur Fahrbahn verlaufenden Streifen die Geschwindigkeitswahrnehmung so zu beeinflussen, dass Fahrer in der Folge ihre Fahrgeschwindigkeit reduzieren.

Die Arbeit von Larish und Flach kann dazu keine Aussage liefern, da sie nicht die Kantendichte systematisch manipulierten. Die zum Frequenzeffekt zitierten Arbeiten können ebenfalls wenig Auskunft geben, da der Stimulus grundsätzlich ein zweidimensionales Muster war und die Bewegung in einer frontoparallelen Ebene erfolgte. Der relevante Stimulus bei der Eigenbewegung ist jedoch durch seine geometrische Tiefe dreidimensional. Die früheren Arbeiten weisen zusätzlich noch die Einschränkung auf, dass die Bewegung nur in einem kleinen Bereich des Gesichtsfeldes stattfand, während bei einer Eigenbewegung die visuelle Bewegung große Bereiche bis hin zum gesamten Gesichtsfeld umfasst. Die einzige bekannte Arbeit, die einen Frequenzeffekt mit dreidimensionalen Stimuli bei einer Eigenbewegung untersuchte, sind die Geschwindigkeitsschätzungen bei simulierter Vorwärtsfahrt von Distler in einer Virtual-Reality-Umgebung (Distler, 2000). In dieser Arbeit wurde die Kantenrate durch Linien, die senkrecht zur Bewegungsrichtung auf der Fahrbahn lagen, oder durch seitlich angebrachte Laternenpfähle erzeugt. Die Kantenrate wurde durch den Abstand der Objekte (alle 5 oder 10 m) manipuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verdoppelung der Dichte, die Geschwindigkeit bis zu ca. 10% schneller geschätzt wurde. Im Vergleich zur Standardbedingung (keine Linien oder Laternenpfähle) konnte durch die Hinzunahme von sichtbaren Kanten die wahrgenommene Geschwindigkeit jedoch nicht erhöht werden - die höheren Kantenraten und die Standardbedingung wurden ungefähr gleich schnell geschätzt, während die niedrigeren Kantenraten sogar eine Geschwindigkeit unter der Standardbedingung signalisierten.

Zur Verringerung der Geschwindigkeit im realen Straßenverkehr wurden gelegentlich Querstreifen mit zunehmend kleiner werdenden Breite auf die Fahrbahn angebracht (Denton, 1980), eine Maßnahme, die mit der Erhöhung der Kantenrate begründet wurde. Für die Praxis würden die oben genannten Ergebnisse bedeuten, dass mit der Anbringung von Querstreifen unter Umständen die wahrgenommene Geschwindigkeit in unerwünschter Weise auch reduziert werden könnte, wodurch die Gefahr besteht, sogar eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zu provozieren. Die Größenordnung der Effekte (ca. 10%) könnte ferner als nicht sehr bedeutungsvoll eingestuft werden, wenn man bedenkt, dass in der realen Umwelt solche Querstreifen nur eine von vielen Informationsquellen zur Geschwindigkeitsbestimmung

sind, und man deshalb erwarten kann, dass die Beeinflussung der Wahrnehmung eher noch schwächer ausfallen könnten. Eine potentielle Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeit durch Querstreifen könnte allerdings auf eine andere Weise wirken: Die Querstreifen könnten von den Fahrern als ein *Symbol* verstanden werden, die eine Stelle im Fahrgeschehen markieren, an der eine Geschwindigkeitsreduktion angebracht ist. Das plötzliche Auftauchen der Querstreifen hat sicherlich einen gewissen Neuigkeitswert, wodurch die Aufmerksamkeit angezogen werden kann. Die Verringerung der Distanz zwischen den Streifen könnte ein weiterer Parameter sein, der „ins Auge springt“.

Einige Experimente zur Geschwindigkeitsschätzung wurden auch unter dem Eindruck von Eigenrotation (zirkuläre Vektion) in einer rotierenden Trommel durchgeführt. In den klassischen Experimenten von Dichgans und Brandt (1978) wurde festgestellt, dass die empfundene Geschwindigkeit der Eigenrotation eine lineare Funktion zur Rotationsgeschwindigkeit der Trommel ist, und keine Abhängigkeit zur Ortsfrequenz aufweist. Die lineare Beziehung zwischen Rotationsgeschwindigkeit und wahrgenommener Geschwindigkeit war dabei auch unabhängig davon, ob Augenbewegungen erlaubt waren oder nicht (Dichgans & Brandt, 1978). Eine weitere Arbeit mit zahlreichen Kombinationen von Orts- und Kontrastfrequenzen zeigte ebenfalls, dass nur die Trommelgeschwindigkeit die empfundene Rotationsgeschwindigkeit bestimmt (de Graaf, Wertheim, Bles, & Kremers, 1990).

Motivation

Aufgrund dieser recht widersprüchlichen Befunde zu einem potentiellen Frequenzeffekt bei der Geschwindigkeitswahrnehmung erschien es sinnvoll einen solchen Effekt selbst zu untersuchen, und zwar unter Bedingungen, die mit dem *Bientunnel-Experiment* (Kapitel 2) vergleichbar sind. Es werden hier zwei psychophysische Experimente vorgestellt, die die Sensitivität zur Geschwindigkeitsdiskrimination und deren Beeinflussung durch unterschiedliche Muster untersuchen. Ein potentieller Frequenzeffekt hätte Konsequenzen für die Interpretation der Befunde im Bientunnel-Experiment. Im ersten Experiment werden hauptsächlich die Unterscheidungsschwellen bei verschiedenen Geschwindigkeiten geprüft. Das zweite Experiment soll die Frage beantworten, welchen Einfluss die unterschiedliche Beschaffenheiten des Musters (unterschiedliche OFn) auf die Geschwindigkeitsdiskrimination haben. Hier interessierte insbesondere der Punkt subjektiver Gleichheit (PSG), also das Geschwindigkeitsverhältnis, bei welchem zwei unterschiedlich gemusterte Stimuli als gleich schnell wahrgenommen werden.

Geschwindigkeitsdiskrimination: Bestimmung der Schwellen

Die ursprüngliche Motivation für dieses Experiment stammt aus der Beobachtung, dass bei Demonstrationen des Bientunnels es manchen Betrachtern anfangs nicht leicht fiel zu erkennen, dass sich eine Wandseite mit doppelter Geschwindigkeit bewegte. Dies nährte den Verdacht, dass nicht alle Teilnehmer des Bientunnel-Experiment die nötige Unterscheidungsfähigkeit besitzen könnten.

Eine zweite Motivation ergab sich aus den unterschiedlichen Leistungen unter den verschiedenen Bedingungen des Bientunnel-Experiments. Führen alle Kombinationen von Ortsfrequenzen und Geschwindigkeiten zu jeweils den gleichen Unterscheidungsschwellen? Oder bringt die Variation von Ortsfrequenz oder Geschwindigkeit auch eine veränderte Diskriminationsleistung mit sich? Sollte das Zweitgenannte der Fall sein, kann man weitere Fragen anschließen: Ist die Diskriminationsleistung eine Funktion der Geschwindigkeit und unabhängig sowohl von der Kontrastfrequenz wie auch von der Ortsfrequenz des Musters? Dann sollten sich durch Variation der Kontrastfrequenz die Diskriminationsleistungen nicht verändern.

Mit einer höheren Vorwärtsgeschwindigkeit ging auch eine höhere Variabilität im Bientunnel einher. Im letzten Kapitel wurde dieser Befund mit Hilfe der Hypothese der kontrollkorrelierten Aktivität interpretiert. Eine alternative Interpretation wäre, dass die Ursache für eine höhere Variabilität darin liegt, dass Geschwindigkeitsunterschiede im höheren Geschwindigkeitsbereich schlechter diskriminiert werden können. Angenommen, die Diskriminationsschwelle im Sinne eines Weber-Quotienten ($\Delta V/V$) wäre bei den höheren Geschwindigkeiten (20 m/s) erhöht, dann dürfte man erwarten, dass die Positionskorrekturen erst bei einem größeren Unterschied der Winkelgeschwindigkeit erfolgen, d.h. bei einer größeren Abweichung von der Mitte. Es würde daraus eine höhere Variabilität der Position resultieren. Gleich große Unterscheidungsschwellen für die hier simulierten Geschwindigkeiten würden dagegen bedeuten, dass die Variabilität in der lateralen Position sich nicht ändern dürfte: Denn bei einer gegebenen Unterscheidungsleistung ist die Position, an der ein Geschwindigkeitsunterschied bemerkt wird, unabhängig von der Vorwärtsgeschwindigkeit. Sie hängt einzig vom Geschwindigkeitsverhältnis beider Wandseiten ab.

Auf individueller Ebene kann man weiterhin die Frage anschließen, ob die jeweiligen Diskriminationsleistungen der einzelnen Fahrer einen Einfluss auf ihr Fahrverhalten haben. Kann man bei Kenntnis der Diskriminationsleistung eines Fahrers vorhersagen, wie effizient dieser Fahrer die Geschwindigkeitsinformation nutzen wird und zu welcher Variabilität oder systematischen Abweichungen dies führen wird? Hierzu können die Daten

aus dem vorigen Fahrexperiment mit den hier ermittelten individuellen Schwellen verglichen werden.

Methoden

Visuelle Stimuli

Ein tiefer Korridor, bestehend aus zwei vertikalen, parallel laufenden Seitenwänden wurde simuliert. Es waren keine Kanten der Seitenwände sichtbar: Die oberen und unteren Kanten lagen außerhalb des Sichtbereichs. Ab einer Tiefe von 120 m wurde die Sichtbarkeit der Seitenwände zunehmend durch simulierten Nebel verringert, bis die Wände im Abstand von 180 m vollständig im Nebel verschwanden. Der horizontale Sichtbereich betrug 180° , ausgenommen einem zentralen Bereich von 3.2° , der durch den Nebel verdeckt wurde. Sichtbare Begrenzungen des Stimulus waren nur an den Enden der Projektionsleinwand zu sehen.

Die Wände wurden mit einem rechteck-modulierten Schwarz-Weiß-Muster texturiert, mit einer fundamentalen Wellenlänge von entweder 10 m (höhere Ortsfrequenz) oder 20 m (niedrigere Ortsfrequenz). Der Abstand beider Wände war 10 m, und die Position des Beobachters war genau in die Mitte zwischen beiden Seiten. Die schwarzen Stellen des Streifenmuster hatten eine Helligkeit (Leuchtdichte) von 0.2 cd/m^2 , die der weißen Stellen betrug ca. 2.0 cd/m^2 .

Versuchsbedingungen

Die Unterscheidungsschwellen wurden in einer Zweifach-Wahlaufgabe (2-AFC-Paradigma) durch die Methode der konstanten Stimuli bestimmt. Vier experimentelle Bedingungen ergaben sich aus zwei Ortsfrequenzen mal zwei unterschiedlichen Vorwärtsgeschwindigkeiten (10 und 20 m/s). In jeder Bedingung war der Referenzstimulus die linke Seitenwand (d.h. konstante Geschwindigkeit), während die rechte Seitenwand den Vergleichsreiz darstellte. Referenzreiz und Vergleichsreiz hatten jeweils die *gleiche* Ortsfrequenz, hingegen war die Vorwärtsgeschwindigkeit des Vergleichsreizes eine von 9 Vielfachen der Referenzreizgeschwindigkeit. Der Quotient der Geschwindigkeit von Vergleichsreiz zu Referenzreiz betrug 0.50, 0.67, 0.83, 0.95, 1.00, 1.05, 1.20, 1.50, oder 2.00. Jeder der neun Vergleichsreize in den vier Bedingungen wurde fünf mal wiederholt. Die Kontrastfrequenz des Referenzreizes in den vier Bedingungen lag bei einem von drei Werten (0.5, 1.0 oder 2.0 Hz), und die Kontrastfrequenz des Vergleichsreizes jeweils dem Produkt aus Referenzreiz-Kontrastfrequenz und einem der neun Geschwindigkeitsquotienten. Eine Übersicht der Parameter ist in Tabelle 1 dargestellt.

	V (m/s)	λ (m)	TF (Hz)	OF 90° (c/°)	OF 45° (c/°)	OF 1.6° (c/°)	V_{\min} / V_{\max} (°/s)
Bedingung 1	10	20	0.5	0.0044	0.0087	5.60	0.088 / 114.6
Bedingung 2	10	10	1.0	0.0087	0.0175	11.19	0.088 / 114.6
Bedingung 3	20	20	1.0	0.0044	0.0087	5.60	0.177 / 229.2
Bedingung 4	20	10	2.0	0.0087	0.0175	11.19	0.177 / 229.2

Tabelle 1 Übersicht über die jeweiligen Geschwindigkeiten (V), Wellenlängen des Streifenmusters (λ), Kontrastfrequenzen (TF), Ortsfrequenzen (OF), sowie den minimalen und maximalen Winkelgeschwindigkeiten (V_{\min} , V_{\max}) des Referenzreizes in den vier experimentellen Bedingungen. Die Ortsfrequenzen beziehen sich auf drei Bereiche in unterschiedlicher Exzentrizität (1.6°, 45° und 90°) von der Leinwandmitte (= 0°).

Durchführung

Ein einzelner Durchgang dauerte vier Sekunden. Neun Teilnehmer wurden instruiert am Ende jedes Durchgangs durch Drücken einer von zwei Richtungstasten auf einer Tastatur anzugeben, welche Wand schneller erschien. Direkt nach Abgabe der Richtungsantwort wurde der nächste Durchgang gestartet. Die Teilnehmer wurden explizit darauf hingewiesen, dass, anders als in der natürlichen Umgebung, die zwei Korridorseiten sich mit unterschiedlichen Vorwärtsgeschwindigkeiten bewegen können. Dieser Versuch wurde für alle Teilnehmer im Anschluss an das Bientunnel-Experiment durchgeführt. Die 180 Durchgänge pro Versuchsperson wurden in ca. 15 min absolviert, in einer, für jede Versuchsperson unterschiedlichen, zufälligen Reihenfolge.

Datenanalyse

Die fünf binären Entscheidungen pro Geschwindigkeitsverhältnis und Versuchsbedingung wurden zu einer Antwortwahrscheinlichkeit zusammengefasst. An die Antwortwahrscheinlichkeiten einer Versuchsbedingung wurde eine kumulative Dichtefunktion einer Normalverteilung angepasst. Aus der so erhaltenen psychometrischen Funktion wurden anschließend die Geschwindigkeitsverhältnisse bestimmt, an denen die Wahrscheinlichkeit der korrekten Identifikation 0.75 bzw. 0.25 betrug. Die Unterscheidungsschwelle (= Weber-Quotient) wurde schließlich als die halbe Differenz der beiden Geschwindigkeitsverhältnisse definiert. Zur inferenzstatistischen Absicherung wurden diese Schwellen dann einer Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den Faktoren *Ortsfrequenz* und *Geschwindigkeit* unterzogen.

Ergebnisse

Die individuellen Unterscheidungsschwellen (siehe Tabelle 2) zeigten, dass alle Versuchspersonen einen Geschwindigkeitsunterschied von Faktor 2 in allen Bedingungen reliabel unterscheiden konnten. Die Mittelwerte der individuellen Schwellen variierten zwischen 0.07 und 0.47 mit einem mittleren Weber-Quotienten von 0.21. Vergleicht man die Unterscheidungsschwellen in Abhängigkeit von der simulierten Geschwindigkeit des Referenzreizes, so stellt man im Durchschnitt niedrigere Schwellen fest, wenn die Vorwärtsgeschwindigkeit von 10 m/s auf 20 m/s erhöht wurde. Dieser Effekt der Geschwindigkeit ist auch in Abbildung 3.3. dargestellt. Eine Varianzanalyse bestätigt den Effekt der Geschwindigkeit, $F(1,8) = 7.70, p < 0.024$. Darüber hinaus ist weder der Faktor Ortsfrequenz noch die einzige Interaktion von Ortsfrequenz mit Geschwindigkeit statistisch signifikant.

	Ortsfrequenz			
	niedrig ($\lambda=20$ m)		hoch ($\lambda=10$ m)	
	Geschwindigkeit		Geschwindigkeit	
Versuchsperson	10 m/s	20 m/s	10 m/s	20 m/s
bar	0.567	0.316	0.662	0.353
frn	0.620	0.158	0.190	0.099
isa	0.152	0.239	0.116	0.219
jan	0.168	0.102	0.286	0.183
kat	0.093	0.198	0.285	0.069
nat	0.231	0.069	0.178	0.040
stf	0.307	0.143	0.324	0.202
sus	0.094	0.084	0.091	0.021
vol	0.151	0.103	0.250	0.189
	Mittelwerte der Bedingungen			
	Bedingung 1	Bedingung 3	Bedingung 2	Bedingung 4
bar - vol	0.2648	0.1569	0.2647	0.1528

Tabelle 2 Individuelle Unterscheidungsschwellen $(p_{0.75}-p_{0.25})/2$ und Mittelwerte der Unterscheidungsschwellen der neun Versuchspersonen in den Bedingungen 1-4 (siehe auch Tabelle 1). Der Faktor Ortsfrequenz wird durch die jeweilige fundamentale Wellenlänge (λ) angegeben.

Da die Verteilung der Unterscheidungsschwellen aufgrund der unteren Schranke und einzelner Ausreißer linkschief war, wurden die individuellen

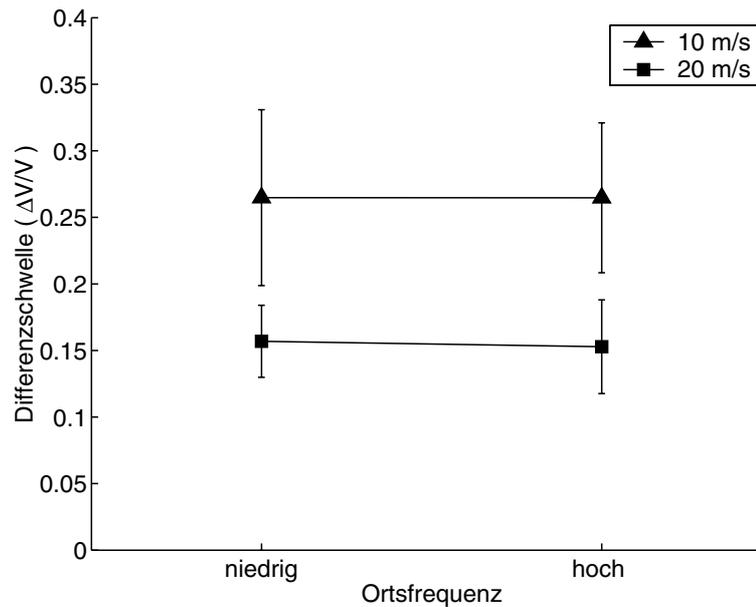


Abbildung 3.3. Differenzschwellen (Weber-Quotienten) bei simultaner Geschwindigkeitsdiskrimination. Die Abbildung zeigt die Mittelwerte der individuellen Differenzschwellen als Funktion der Ortsfrequenz und der Geschwindigkeit (siehe auch Tabelle 2). Hohe Geschwindigkeiten (20 m/s) werden leichter unterschieden als niedrige (10 m/s). Durch Variation der Ortsfrequenz des Streifenmusters (und somit auch der Kontrastfrequenz) wird die Unterscheidungsleistung nicht beeinflusst. Fehlerbalken stellen ± 1 Standardschätzfehler des Mittelwerts dar.

Schwellenwerte logarithmisch transformiert (\log_{10}), bevor sie erneut einer Varianzanalyse unterzogen wurden. Auch auf Basis der transformierten Daten zeigte sich ein signifikanter Effekt des Faktors Geschwindigkeit, $F(1,8) = 9.90$, $p = 0.014$, bei Abwesenheit weiterer Effekte.

Der Befund, dass die Differenzschwellen nicht von der Kontrastfrequenz des Stimulus abzuhängen scheinen, sei nochmal explizit verdeutlicht: Die Kontrastfrequenzen des Stimulus in den Paarungen hohe Ortsfrequenz mit niedriger Geschwindigkeit sowie niedrige Ortsfrequenz mit hoher Geschwindigkeit waren exakt die gleichen - die beiden Bedingungen unterschieden sich jedoch deutlich in den ermittelten Differenzschwellen.

Vergleich der Diskriminationsschwellen mit der Fahrleistung

Die neun hier getesteten Personen absolvierten auch das Bientunnel-Experiment. Dadurch war es möglich, die hier gemessenen Diskriminationsleistungen mit den Fahrleistungen zu vergleichen. Dadurch sollte die Frage beantwortet werden, ob die Güte der Diskrimination mit der Fahrgenauigkeit oder mit der Größe der systematischen Abweichung in irgendeiner Beziehung steht. Es wurde erwartet, dass niedrige Weber-Quotienten, die eine hohe Diskriminationsleistung anzeigen, für eine Abgleichstrategie, wel-

che die Wandgeschwindigkeiten berücksichtigt, förderlich sein sollte. Die Hypothesen können folgendermaßen formuliert werden:

- In den Kontrollbedingungen mit gleichen Ortsfrequenzen und gleichen Geschwindigkeiten, sollte die gemessene Standardabweichung mit den Weber-Quotienten positiv korrelieren. Eine gute Diskriminationsleistung sollte es erleichtern die Wandgeschwindigkeitsinformation zu berücksichtigen, und so die Zuverlässigkeit zu erhöhen, mit der die Position im Korridor geschätzt wird.
- Bei unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten würde man erwarten, dass Fahrer mit niedrigen Weber-Quotienten diesen Unterschied stärker oder früher wahrnehmen, und stärkere Korrekturen vornehmen. Der Weber-Quotient sollte dann mit der Abweichung negativ korrelieren.
- Bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen sollten die Weber-Quotienten mit der Abweichung positiv korrelieren, da mit zunehmender Abweichung von der Korridormitte die Wandgeschwindigkeiten sich zunehmend unterscheiden. Ein Fahrer mit einer schlechteren Unterscheidungsleistung sollte von diesem Konflikt weniger beeinflusst werden.

Zur Berechnung der Korrelation wurde die Standardabweichung bzw. die laterale Abweichung in den o.g. Bedingungen bestimmt. Jeweils ein Wert repräsentierte die Leistung einer Versuchsperson in den Bedingungen ohne Seitenlinien, mit Seitenlinien und über alle Bedingungen des Experiments. Korreliert wurden diese drei Werte als Erstes mit dem durchschnittlichen Weber-Quotienten jeder Versuchsperson im Diskriminationsexperiment. Die zweite Korrelation erfolgte mit dem jeweils niedrigsten Weber-Quotienten jeder Versuchsperson, wie er der Tabelle 2 zu entnehmen ist. Damit war die Erwartung verbunden, dass die niedrigste Schwelle besser die maximal erreichbare Unterscheidungsgrenze für eine Versuchsperson widerspiegelt, als der durchschnittliche Weber-Quotient, und weniger zufällige Einflussfaktoren enthält. Die Annahme, dass der niedrigste Weber-Quotient das stabilere Maß sein könnte, äußerte sich auch darin, dass die Standardabweichung der niedrigsten Quotienten kleiner war als die der durchschnittlichen Quotienten der Teilnehmer.

Die gefundenen Korrelationen sind in Tabelle 3 dargestellt. Es zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Standardabweichung in der Kontrollbedingung und den Diskriminationsschwellen. Damit wurde die erste Hypothese nicht bestätigt, nach der eine gute Unterscheidungsleistung geholfen haben könnte, die Korridormitte besser zu halten.

Ein negativer Zusammenhang bestand zwischen den individuellen Weber-Quotienten und dem Betrag der lateralen Abweichung, wenn sich in den Durchfahrten die Wandgeschwindigkeiten um Faktor 2 unterschieden.

Vier der sechs Korrelationskoeffizienten waren signifikant ($p < 0.05$), und die restlichen zwei verpassten dieses Niveau nur knapp. Somit scheint es gerechtfertigt zu sagen, dass bei einer guten Unterscheidungsfähigkeit die Fahrer für unterschiedliche Wandgeschwindigkeiten empfindlicher waren und folglich stärker korrigierend darauf reagierten. Auffällig war hierbei auch, dass ein Zusammenhang bestand, wenn Seitenlinieninformationen die seitlichen Grenzen des Korridor anzeigten. Wie im vorigen Kapitel dargestellt, findet man trotz Seitenlinieninformation eine signifikante Abweichung in Richtung der langsameren Wandgeschwindigkeit. Dieser Umstand war wahrscheinlich eine notwendige Voraussetzung dafür, dass auch hier ein relativ hoher (negativer) Zusammenhang zwischen Diskriminationsleistung und lateraler Abweichung zu beobachten war.

Fahrparameter	Seitenlinieninformation	Korrelation mit individuellen Weber-Quotient	
		Mittelwert	Minimum
Standardabweichung in der Kontrollbedingung	ohne SL	0.150	0.107
	nur SL	-0.220	-0.247
	alle	-0.067	-0.101
Laterale Abweichung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten	ohne SL	-0.585*	-0.470
	nur SL	-0.525	-0.597*
	alle	-0.637*	-0.591*
Laterale Abweichung bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen	ohne SL	0.487	0.621*
	nur SL	-0.373	-0.268
	alle	0.237	0.387

Tabelle 3 Korrelationen verschiedener Fahrparameter aus dem Bientunnel-Experiment (siehe Kapitel 2) mit zwei Diskriminationsleistungsmaßen. Das erste Leistungsmaß („Mittelwert“) bezieht sich auf den Durchschnitt der Unterscheidungsschwellen jedes Probanden in den vier getesteten Bedingungen, das zweite Leistungsmaß („Minimum“) auf die jeweils kleinste Unterscheidungsschwelle jedes einzelnen Probanden (siehe Werte in Tabelle 2). Die Korrelationen wurden auch getrennt danach berechnet, ob in den jeweiligen Fahrten im Bientunnel Seitenlinieninformation (SL) zur Verfügung stand oder nicht. Sternsymbole (*) markieren signifikante Korrelationskoeffizienten - Signifikanzniveau ist erreicht, wenn $r > 0.582$ (mit $p < 0.05$, einseitiger Test, $n = 9$).

Eine signifikante Korrelation zeigte sich schließlich auch zwischen der lateralen Abweichung bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen (aber gleichen Geschwindigkeiten) und der Diskriminationsleistung. Ein gute Diskriminationsleistung ging mit einer geringeren lateralen Abweichung einher, bzw. ein hohen Weber-Quotient mit einer hohen Abweichung. Dieser Befund kann damit erklärt werden, dass dem Ausgleich der unterschiedlichen Orts-

frequenzen eine zweite Strategie entgegen wirkte, die Wandgeschwindigkeiten auszugleichen. Eine große laterale Abweichung wurde durch die zunehmend unterschiedlichen Wandgeschwindigkeiten verhindert. Fahrer mit einer besseren Geschwindigkeitsdiskrimination könnten diesen Konflikt eher wahrgenommen und sich eher zentraler im Tunnel positioniert haben. Diese Beziehung zwischen Diskriminationsschwellen und lateraler Abweichung von der Mitte des Korridors zeigte sich jedoch nur, wenn keine Seitenlinieninformation zur Verfügung stand. Wenn noch zusätzlich Seitenlinien die Position im Tunnel angaben, lag tendenziell ein umgekehrter Zusammenhang vor: Eine gute Diskrimination ging eher mit einer größeren lateralen Abweichung einher.

Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse dieses psychophysischen Experimentes lassen sich kurz zusammenfassen. Alle neun Teilnehmer besaßen die erforderliche Differenzierungsleistung, um die zwei Geschwindigkeiten von 10 und 20 m/s zu unterscheiden. Die Unterscheidungsschwellen waren jedoch nicht für alle vier Ortsfrequenz-Geschwindigkeit-Kombinationen gleich hoch. Die Unterscheidungsschwellen erniedrigten sich, wenn die Referenzgeschwindigkeit von 10 auf 20 m/s erhöht wurde.

Zwischen den individuellen Diskriminationsleistungen und einigen Fahrleistungsparametern ließen sich signifikante Korrelationen beobachten. Ein deutlicher Zusammenhang bestand zwischen den Diskriminationsschwellen und der lateralen Position, wenn eine zentrale Position zwischen zwei Seitenwänden eingenommen werden sollte, welche sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegten: Gute Diskriminierer zeigten eine stärkere Abweichung von der Korridormitte, wobei die stärkere Abweichung vermutlich eine stärkere Tendenz die Wandgeschwindigkeiten abzugleichen widerspiegelt. Ein gewisser Zusammenhang zeigte sich auch zwischen den Diskriminationsschwellen und der lateralen Position, wenn sich die Ortsfrequenzen der Seitenwände unterschieden. Gute Diskriminierer zeigten eine geringere Abweichung von der Korridormitte. Auch dieser Befund spiegelt wahrscheinlich eine stärkere Tendenz die Wandgeschwindigkeiten abzugleichen wider. Es ließ sich dagegen kein Zusammenhang finden zwischen den Diskriminationsschwellen und der Standardabweichung der lateralen Position: Bei Kenntnis der individuellen Unterscheidungsfähigkeit kann die Präzision der Spurhaltung nicht vorhergesagt werden. Dass sich nur mit manchen Fahrleistungsparametern Korrelationen zeigten, deutet ferner darauf hin, dass die Korrelationen nicht lediglich Faktoren wie die Motivation oder Aufmerksamkeit der Versuchspersonen gegenüber den experimentellen Aufgaben wiedergeben.

Diese Ergebnisse können auch hinsichtlich eines möglichen Frequenzeffektes bei der Geschwindigkeitswahrnehmung interpretiert werden. Dazu soll hier nochmal auf die experimentelle Logik früherer Arbeiten Bezug genommen werden, anhand derer auch diese Befunde betrachtet werden sollen. Die Argumentation folgt der Linie, wie sie von McKee et al. und Chen et al. in Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsdiskrimination von zweidimensionalen Gratings entwickelt wurde (Chen et al., 1998; McKee et al., 1986).

Man geht davon aus, dass Unterscheidungsschwellen die „Signal-zu-Rauschen“-Charakteristik einer zu Grunde liegenden neuronalen Verschaltung wiedergeben. Nun kann man erwarten, dass jede Störung, die das Rauschen im relevanten Signal, hier das Geschwindigkeitssignal, erhöht, auch zu einer Erhöhung der Unterscheidungsschwellen führt. Will man prüfen, ob die relevante Dimension (hier die Geschwindigkeit) von einer zweiten Dimension (hier die Kontrastfrequenz) tatsächlich unabhängig ist, kann man versuchen experimentell „Rauschen“ zu erzeugen, in dem man die zweite Dimension variiert. Dies wurde hier in den Dimensionen Ortsfrequenz und Kontrastfrequenz vorgenommen. Ist die Änderung in der zweiten Dimension dann tatsächlich ein *effektives* Rauschen, weil sie in der neuronalen Verschaltung mitverarbeitet wird, findet man erhöhte Diskriminationsschwellen für die relevante Dimension. Sind die Diskriminationsschwellen trotz der vorgenommenen Änderungen dagegen unverändert, ist die relevante Dimension von der zweiten Dimension unabhängig, oder die Veränderungen in der zweiten Dimension können kompensiert werden.

Die Änderung der Orts- und Kontrastfrequenzen führten hier nicht zu einer Veränderung der Diskriminationsschwellen, und können somit nicht als effektives Rauschen gelten. Die Unterscheidungsschwellen änderten sich in diesem Experiment als Funktion der Geschwindigkeit und nicht der Kontrastfrequenz. Aus den hier gewonnenen Daten kann man somit einen Frequenzeffekt auf die Geschwindigkeit nicht nachweisen.

Die ermittelten Unterscheidungsschwellen (0.02-0.66) liegen im Vergleich zu manch anderen Diskriminationsexperimenten höher. Es wurden gelegentlich Weber-Quotienten von 0.05 bis 0.15 über große Geschwindigkeitsbereiche berichtet (z.B. Chen et al., 1998; McKee et al., 1986). Jedoch findet man auch gelegentlich höhere Schwellen, vor allem in Verbindung mit großer Exzentrizität und niedriger Geschwindigkeit des Stimulus (Orban et al., 1985; Turano & Pantle, 1989). Zu diesen Experimenten existiert eine Vielzahl an Unterschieden, die den Vergleich nahezu unmöglich machen. Die zwei wichtigsten Unterschiede liegen vielleicht darin, dass (a) in diesem Experiment durch die große Projektion viel größere Bereiche des Sichtfeldes stimuliert wurden als in anderen Versuchsaufbauten, und dass (b) die Stimuli

durch Ortsfrequenzen und Winkelgeschwindigkeiten charakterisiert waren, die sich über eine weite Spanne verteilten. Im Gegensatz dazu präsentierten die meisten früheren Arbeiten eine einzige Ortsfrequenz, da die Bewegung des Stimulus in der frontoparallelen Ebene erfolgte.

In einer Arbeit wurde die Geschwindigkeitsdiskrimination bei einer Vorwärtsbewegung über einem flachen Terrain bestimmt (Moenen & Brenner, 1994). Diese Arbeit ist insofern eher mit der hier dargestellten Untersuchung vergleichbar, als die Beobachter ebenfalls eine Spanne an Winkelgeschwindigkeiten zu sehen bekamen. Dort wurde berichtet, dass die Geschwindigkeitszunahme, die erforderlich ist um eine Geschwindigkeitsänderung innerhalb 500 ms zu bemerken, eine U-förmige Funktion der Vorwärtsgeschwindigkeit ist. Eine extrem schlechte Performanz ließ sich bei hohen (~60 km/h) und bei sehr niedrigen (~2 km/h) Geschwindigkeiten feststellen. Aber selbst im optimalen Geschwindigkeitsbereich (20-40 km/h) war die benötigte Geschwindigkeitserhöhung um einen Unterschied zu erkennen, mit 50% immer noch überraschend hoch. Aufgrund dieser hohen Diskriminationsschwellen folgerten die Autoren, dass die eigene Geschwindigkeit nicht über den optischen Fluss bestimmt werden kann. Die hier ermittelten Unterscheidungsschwellen liegen deutlich niedriger, wobei einer der Gründe darin liegen könnte, dass die zu vergleichenden Geschwindigkeiten simultan sichtbar waren. Ein weiterer Grund könnte darin liegen, dass die Zeit für die Antwortabgabe hier nicht eingeschränkt wurde, verglichen mit dem 500ms-Fenster in der Studie von Moenen und Brenner (1994). Die niedrigeren Unterscheidungsschwellen bedeuten auf jeden Fall, dass die Aussage, die Geschwindigkeit könne nicht über optischen Fluss bestimmt werden, nicht aufrechterhalten werden kann.

Subjektive Gleichheit bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen

Eine unmittelbare Möglichkeit, eine Beeinflussung der wahrgenommenen Geschwindigkeit durch die Frequenz des Musters zu untersuchen, besteht darin, direkt danach zu fragen, welches von zwei Mustern sich schneller oder langsamer zu bewegen scheint. Im Unterschied zum vorherigen Experiment interessiert hierbei nicht in erster Linie die Differenz der Geschwindigkeit, die notwendig ist um einen Unterschied wahrzunehmen, sondern das Geschwindigkeitsverhältnis, bei welchem beide Muster als gleich schnell erlebt werden. Dieser so genannte Punkt subjektiver Gleichheit (PSG) sollte sich verschieben, wenn ein systematischer Effekt der Ortsfrequenz des Musters auf die wahrgenommene Geschwindigkeit existiert.

Methoden

Die grundsätzliche Vorgehensweise dieses Versuchs entspricht weitgehend der des vorigen Experiments. Als Erweiterung dazu wurde die Geschwindigkeitsdiskrimination zusätzlich in Durchgängen gemessen, in denen sich die Ortsfrequenzen der Seitenwände unterschieden. Dadurch konnte unter Beibehaltung der optischen Geschwindigkeit, die Kontrastfrequenz des Musters geändert werden und ihr Einfluss auf die Geschwindigkeitsdiskrimination untersucht werden. Im Gegensatz zum vorigen Versuch wurde die Diskriminationsaufgabe nicht auf einer 180°-Leinwand sondern vor einem Computermonitor durchgeführt, der einen deutlich geringeren Sehbereich zuließ.

Apparatur

Der Blick in einen Korridor wurde auf einem Computermonitor mit einer Auflösung von 1280 x 1024 Bildpunkten simuliert. Die Versuchspersonen blickten durch eine runde Öffnung eines rechteckigen Trichters, an dessen Ende in 80 cm Entfernung sich der Monitor befand, während sie ihr Kinn auf einer Kinnstütze hielten. Das Innere des Trichter war mit schwarzem Stoff ausgekleidet, so dass Reflexionen des Monitorlichts weitgehend unterdrückt wurden.

Versuchsbedingungen

Wie im vorhergehenden Experiment, wurde ein Korridor simuliert, welcher aus parallel verlaufenden Seitenwänden bestand. Die Szene wurde auf dem Bildschirm durch eine rechteckigen Öffnung präsentiert, mit einem Sichtfeld von 27° horizontal und 8.6° vertikal. Der Korridor war in einer Tiefe von 20.8 m bis 200 m uneingeschränkt sichtbar¹. Die Bildwiederholungsrate (refresh-rate) des Monitors erreichte 72 Hz, und die Aktualisierungsrate (update-rate) der Szenengeometrie 36 Hz. In jedem Durchgang wurden beide Tunnelwände gleichzeitig präsentiert und simulierten eine Vorwärtsfahrt des Beobachters. Eine Seitenwand (Referenzreiz) simulierte immer eine Geschwindigkeit von 8 m/s, während die gegenüberliegende Seitenwand (Vergleichsreiz) mit einer von 15 Geschwindigkeiten bewegt wurde, so dass das Geschwindigkeitsverhältnis von Vergleichs- zu Referenzreiz im Bereich

1) Bei der psychophysischen Bestimmung der Bewegungswahrnehmung ist es normalerweise üblich, die Grenzen des Stimulus zu verwischen, beispielsweise durch Anwendung einer Gauß-Filterung (z.B. Tayama, 2000). Dadurch soll verhindert werden, dass die Versuchspersonen die Helligkeitsänderungen der Stimuluskanten als Referenz für ihr Wahrnehmungsurteil verwenden. Dies ist vor allem erforderlich, wenn absolute Bewegung, und nicht Relativbewegung zu einer Referenz, untersucht werden soll. Da in diesem Experiment die Geschwindigkeit und nicht die Bewegung als solche interessiert, ist es wahrscheinlich, dass die Helligkeitsänderungen an den Stimuluskanten an sich keine bedeutsame Entscheidungshilfe stellten.

von 0.3-1.7 lag (mit Inkrementen von 0.1). Die Winkelgeschwindigkeit der Referenzwand lag zwischen $5^\circ/\text{s}$ (am nächsten sichtbaren Punkt) und $0.057^\circ/\text{s}$ (am entferntesten Punkt bei 200 m). Die Referenzwand wurde mit einem rechteck-modulierten, schwarz-weißen Streifenmuster texturiert, dessen Wellenlänge 10 m oder 20 m war. Die weißen Stellen im Streifenmuster hatten eine Leuchtdichte von ca. $8.5 \text{ cd}/\text{m}^2$, während die der schwarzen Streifen bei ca. $0.5 \text{ cd}/\text{m}^2$ lag. Die kurzwelligere Seite hatte einen Ortsfrequenz-Gradienten, der von $0.0092 \text{ c}/^\circ$ bis $14.0 \text{ c}/^\circ$ verlief. Die langwellige Seite hatte einen Ortsfrequenz-Gradienten, der entsprechend von 0.0046 bis $7.0 \text{ c}/^\circ$ verlief. Die Vergleichswand trug entweder ein identisches Muster (10 oder 20 m) oder ein Muster, dessen Ortsfrequenz verdoppelt war (Wellenlängen von 5 bzw. 10 m). Entsprechend resultierten bei diesen drei verwendeten Ortsfrequenzen und einer Referenzgeschwindigkeit von $8 \text{ m}/\text{s}$ Kontrastfrequenzen von 0.4, 0.8 und 1.6 Hz. Die einzigen statischen Kanten im Stimulus entstanden durch die Begrenzung der Öffnung und durch die senkrechten Grenzen der Seitenwände in 200 m Entfernung.

Durchführung

Zu Beginn des Experimentes wurde die Aufgabe anhand 5 -10 Testdurchgängen jedem Versuchsteilnehmer einzeln demonstriert. Der Stimulus wurde in jedem Durchgang 4 s lang dargeboten. Die Teilnehmer gaben durch Betätigen einer Taste an, welche Seitenwand schneller erschien. Die Versuchspersonen wurden instruiert, während eines Durchgangs ein kleines gelbes Rechteck in der Mitte des Bildschirms zu fixieren. Die insgesamt 600 Durchgänge wurde in drei Blöcken à 200 aufgeteilt. Die Durchgänge wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Die Position auf der die Referenzseite präsentiert wurde, wurden ebenfalls zufällig bestimmt. Zwischen den Blöcken wurde eine Pause von ca. 1 Stunde eingelegt. Die 14 studentischen Versuchspersonen, im Alter zwischen 23 und 27 Jahren, absolvierten das Experiment im Rahmen eines einwöchigen Praktikums. Sie wurden vorher über die Fragestellung des Experimentes informiert, waren jedoch naiv hinsichtlich der Richtung eines zu erwartenden Effekts.

Ergebnisse

Das empirische Ziel dieser Untersuchung war es festzustellen, ob durch unterschiedliche Ortsfrequenzen des Texturmusters sich systematische Unterschiede in der Geschwindigkeitswahrnehmung beobachten lassen. Wenn ein systematischer Effekt vorliegen sollte, würde man insbesondere erwarten, dass ein räumlich höher-frequentes Muster als schneller empfunden wird, wie es Ergebnisse von Chen et al. nahe legen (1998). Dazu wurden aus den Antworthäufigkeiten (10 Wiederholungen von 15 Geschwindigkeitsverhältnissen in jeder Bedingung) individuelle psychometrische Funkti-

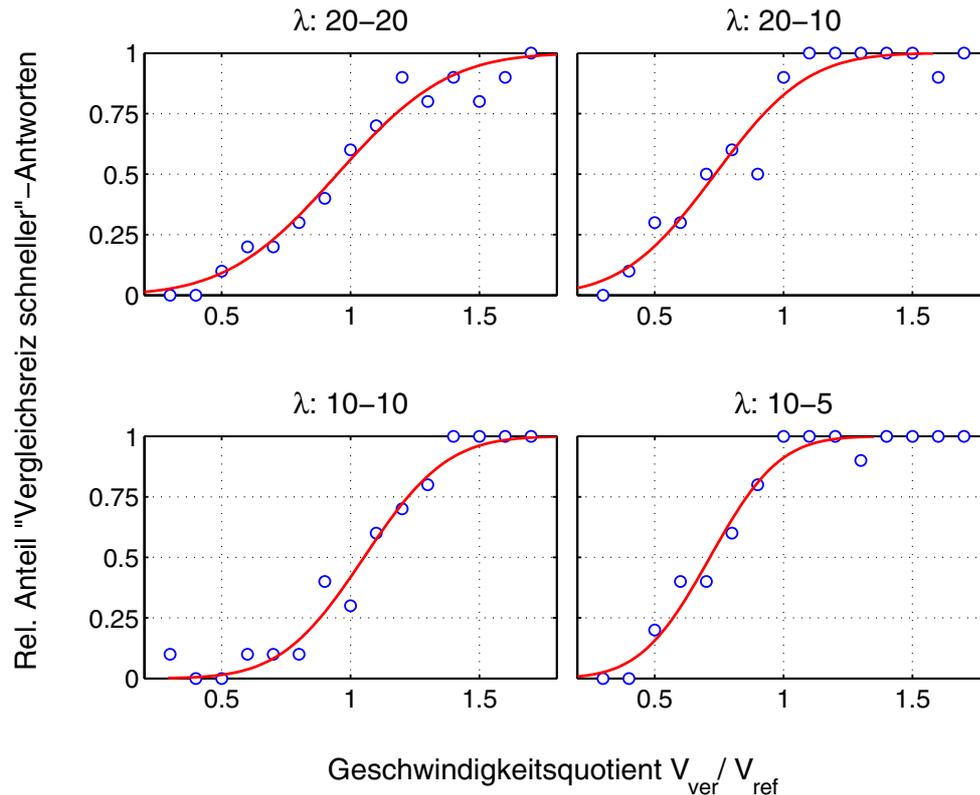


Abbildung 3.4. Psychometrische Funktionen einer repräsentativen Versuchsperson. Die Graphen zeigen die Wahrscheinlichkeit, dass die Versuchsperson den Vergleichsreiz als schneller wahrgenommen hat, in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis von Vergleichsreiz zu Referenzreiz. Die beiden linken Graphen zeigen die Wahrscheinlichkeit an, wenn beide Seitenwände mit einem Streifenmuster der gleichen Wellenlänge λ (z.B. 20 m auf der linken und rechten Seite) texturiert waren, und die beiden rechten, wenn sich die Wellenlängen λ unterschieden (z.B. links 10 m, rechts 5 m). Kreissymbole repräsentieren den Mittelwert der 10 binären Antworten pro Geschwindigkeitsverhältnis, an die eine kumulative Dichtefunktion einer Normalverteilung angepasst wurde. Bei unterschiedlicher Ortsfrequenz beider Seiten (rechte Graphen), sind die Kurven nach links verschoben und der Punkt subjektiver Gleichheit (Antwortwahrscheinlichkeit $p = 0.5$) wird bereits bei einer deutlich niedrigeren Geschwindigkeit erreicht.

onen angepasst, und aus diesen der Punkt subjektiver Gleichheit bestimmt (PSG), der in diesem Fall einer Antwortwahrscheinlichkeit von 50% entspricht. Die Antwortwahrscheinlichkeiten und die angepassten psychometrischen Funktionen einer Versuchsperson sind in Abbildung 3.4. exemplarisch dargestellt.

Zur Analyse wurden die Ergebnisse von 11 der 14 Versuchspersonen berücksichtigt, da die restlichen 3 Teilnehmer unvollständige Datensätze aufwiesen. Der mittlere PSG der vier experimentellen Bedingungen ist in Abbildung 3.5. dargestellt. Wenn beide Seitenwände mit einem Streifenmuster der gleichen Wellenlänge texturiert waren, empfanden die Teilnehmer beide Seiten dann als gleich schnell, wenn auch die objektiven Geschwindigkeiten ähnlich waren, d.h. bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von Ver-

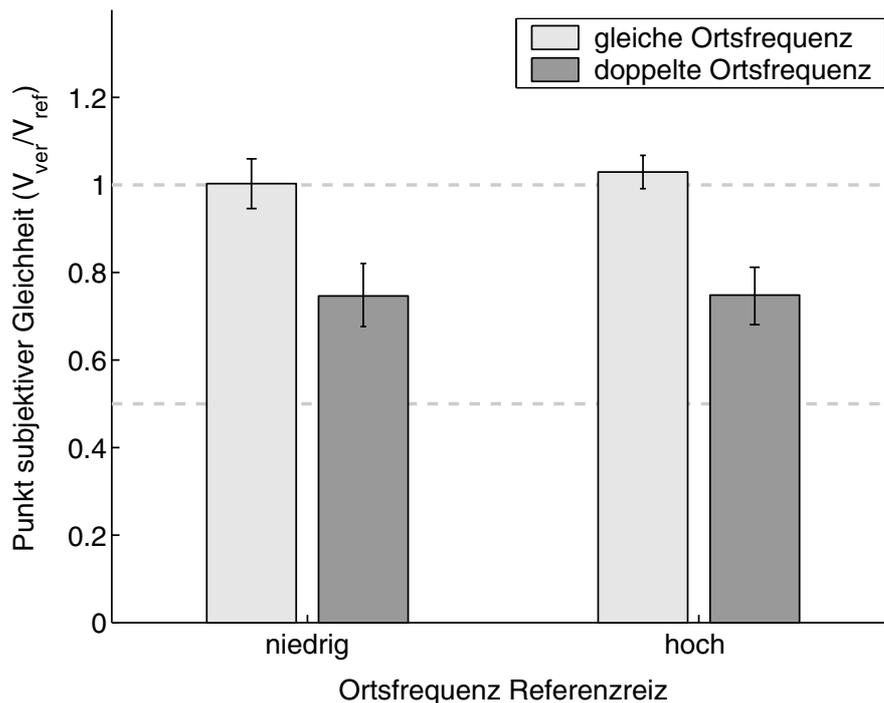


Abbildung 3.5. Ergebnisse zum Punkt subjektiver Gleichheit. Die Referenzwand bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 8 m/s (V_{ref}), und die Geschwindigkeit der Vergleichswand (V_{ver}) variiert um das 0.3- bis 1.7-fache von V_{ref} . Wenn der Referenzreiz (linke Seitenwand) und der Vergleichsreiz (rechte Seitenwand) die gleiche Ortsfrequenz besitzen (helle Balken), erscheinen beide Seiten subjektiv gleich schnell, wenn das Geschwindigkeitsverhältnis von V_{ver}/V_{ref} nahe 1 ist, d.h. bei gleicher objektiver Geschwindigkeit (obere unterbrochene Linie). Ist die Ortsfrequenz des Vergleichsreizes dagegen um das Zweifache gegenüber dem Referenzreiz erhöht (dunkle Balken), wird subjektiv die gleiche Geschwindigkeit bei einem deutlich niedrigeren Geschwindigkeitsverhältnis angegeben. Die Seite mit der höheren Ortsfrequenz muss nur noch ca. drei Viertel der Referenzgeschwindigkeit aufweisen, um als gleich schnell wahrgenommen zu werden. Der PSG in dieser Bedingung liegt zwischen der objektiv gleich großen Geschwindigkeiten und den objektiv gleichen Kontrastfrequenzen beider Seiten (untere unterbrochene Linie). Jeder Balken stellt den Mittelwert des PSG von 11 Versuchspersonen dar. Die Fehlerbalken repräsentieren ± 1 Standardabweichung der individuellen PSG.

gleichs- zu Referenzstimulus nahe 1. Anders dagegen, wenn die gegenüberliegende Seite mit einem Streifenmuster doppelter Ortsfrequenz texturiert war. Nun genügten ca. 75% der Referenzgeschwindigkeit, damit beide Seiten als gleich schnell empfunden wurden. Eine Varianzanalyse mit den Faktoren Ortsfrequenz des Referenzreizes und Gleichheit der Ortsfrequenz bestätigte die Ergebnisse inferenzstatistisch. Danach war der PSG abhängig davon, ob die gegenüberliegende Seitenwand die gleiche ($PSG_{gl} = 1.016$) oder eine unterschiedliche Ortsfrequenz ($PSG_{unt} = 0.747$) besaß, $F(1,10) = 139.34$, $p < 0.001$. Der Faktor Gleichheit der Ortsfrequenzen erklärt einen sehr großen Anteil der Gesamtvarianz (84.5%) und zeigt eine

Effektgröße $f = 3.73$, die nach gängiger Meinung als ein sehr großer Effekt angesehen wird (Cohen, 1988 S. 287).

Auf die Höhe der Unterscheidungsschwellen ließ sich kein statistisch signifikanter Einfluss der experimentellen Faktoren nachweisen (alle Vergleiche, $p > 0.05$). Die über die Versuchspersonen gemittelten Weber-Quotienten ($\Delta V/V$) in den vier Bedingungen lagen zwischen 0.150 und 0.174, mit einem Gesamtmittelwert von 0.166 (siehe auch Abbildung 3.6.). Dieser Wert ist somit geringfügig niedriger als im vorher beschriebenen Experiment zur Ermittlung der Unterscheidungsschwellen.

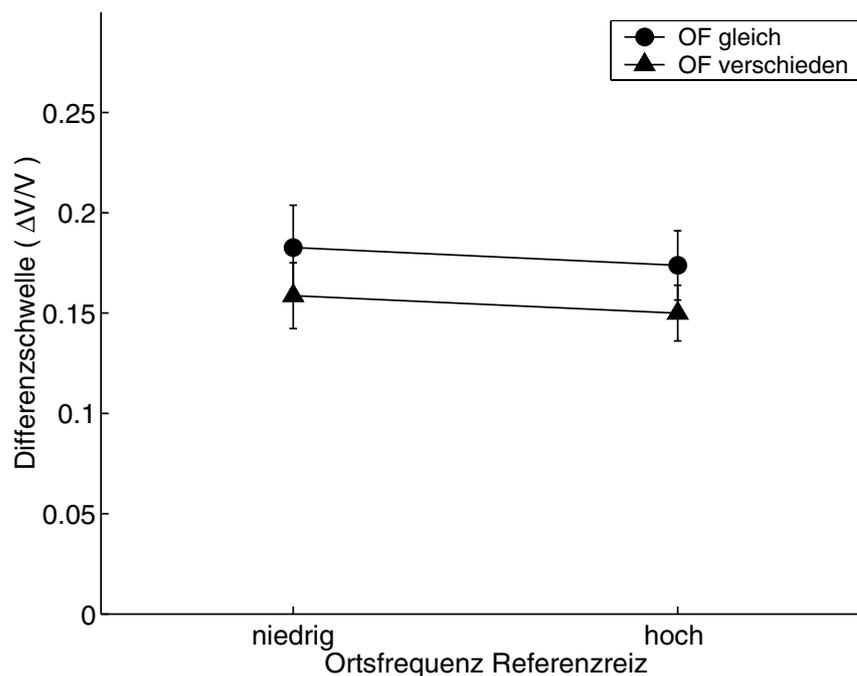


Abbildung 3.6. Diskriminationsschwellen, wenn die Seitenwände gleiche oder unterschiedliche Ortsfrequenzen aufweisen. Eine niedrige Ortsfrequenz bezieht sich auf eine Referenzseite mit einer Wellenlänge von 20 m, eine hohe Ortsfrequenz auf eine Wellenlänge von 10 m. Die gegenüberliegende Vergleichsseite hatte entweder die gleiche Ortsfrequenz (●) oder eine doppelte Ortsfrequenz (▲). Alle Unterschiede sind nicht signifikant ($p > 0.05$).

Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigten einen deutlichen Einfluss der Ortsfrequenzen und somit auch der Kontrastfrequenzen auf den Punkt subjektiver Gleichheit in einer Geschwindigkeitsdiskriminationsaufgabe. Wurde die Ortsfrequenz auf einer Seite des Korridors verdoppelt, dann wurde die Geschwindigkeit dieser Seite auch als schneller wahrgenommen, bzw. die Geschwindigkeit dieser Seite musste reduziert werden, um als „gleich schnell“ empfunden zu werden. Diese Befunde scheinen im Ein-

klang mit der Hypothese zu stehen, dass die Kontrastfrequenz des Stimulus die Geschwindigkeitswahrnehmung maßgeblich beeinflusst. Dabei ging die Veränderung des Punktes subjektiver Gleichheit (PSG) nicht mit einer signifikanten Veränderung der Unterscheidungsschwellen einher: Die Tatsache, dass unterschiedliche räumliche und zeitliche Frequenzen jeweils die gleiche Geschwindigkeit definierten, ließ die Teilnehmer nicht „unsicherer“ in ihrem Antwortverhalten werden. Der beobachtete Frequenzeffekt ist verhältnismäßig groß. Wie in Abbildung 3.5. zu sehen ist, liegt der PSG genau zwischen den Werten, die man erwarten würde, wenn die Antwort der Versuchspersonen, entweder gemäß (a) den objektiven Winkelgeschwindigkeiten oder gemäß (b) den objektiven Kontrastfrequenzen ausgefallen wäre. Der ermittelte PSG kann so interpretiert werden, als ob Kontrastfrequenz und objektive Geschwindigkeit einen gleich großen Beitrag zur wahrgenommenen Geschwindigkeit hatten.

Der beobachtete Frequenzeffekt erscheint andererseits auch ungewöhnlich, da Augenfixationen nicht kontrolliert wurden. Manche Versuchspersonen äußerten auf Befragen, die Stimuli mit den Augen verfolgt zu haben, um so einen besseren Eindruck von der Geschwindigkeit zu bekommen. Ältere Arbeiten berichten, dass die wahrgenommene Geschwindigkeit nicht von der Frequenz des Stimulus abhängt, wenn den Versuchspersonen Augenfolgebewegungen gestattet wurden (z.B. Diener et al., 1976), und damit in Übereinstimmung ist der Befund, dass die langsame Phase des optokinetischen Nystagmus ebenfalls von der räumlichen Frequenz des Musters unabhängig ist (de Graaf et al., 1990; Kirschfeld, 1991). Augenbewegungen scheinen dann eine zusätzliche Informationsquelle zu bilden, die zur Schätzung der Geschwindigkeit genutzt werden kann.

Statt über die Kontrastfrequenz, soll schließlich eine alternative Interpretation versucht werden. Sie betont den wahrgenommenen Abstand des Stimulus, um den beobachteten Frequenzeffekt zu erklären. Die Probanden könnten ihr Geschwindigkeitsurteil entsprechend der Winkelgeschwindigkeit des Stimulus gebildet haben. In das Geschwindigkeitsurteil kann aber auch der wahrgenommene Abstand des Stimulus eingegangen sein, so dass die Probanden die Winkelgeschwindigkeit des Stimulus zu einer *absoluten (objektiven) Geschwindigkeit* skalierten. Die Frage nach der wahrgenommenen Geschwindigkeit ist dann nicht mehr „wie schnell bewegt sich etwas über die Retina“, sondern „wie schnell ist es in der Welt?“. Zwei Stimuli mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, aber in unterschiedlicher Tiefe, werden normalerweise so interpretiert, dass der weiter entfernte Stimulus, die höhere absolute (objektive) Geschwindigkeit besitzt. Dies ist einfach eine Umformulierung des Phänomens der Geschwindigkeitskonstanz, nach dem zwei gleich schnelle Objekte, die sich in unterschiedlicher Tiefe befinden, trotz

unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit auch tatsächlich als gleich schnell wahrgenommen werden. Faktoren, die demnach den wahrgenommenen Abstand beeinflussen, sollten dann auch die Absolutgeschwindigkeit verändern. Im Bientunnel-Experiment (Kapitel 2) wurde beobachtet, dass wenn die Teilnehmer zwischen zwei Seitenwänden ungleicher Ortsfrequenzen fahren sollten, sie sich näher zur Seite mit der höheren Ortsfrequenz stellten. Eine höhere Ortsfrequenz wurde als ein Stimulus in größerer Distanz gesehen. Aus Experimenten zur Geschwindigkeitskonstanz ist ferner bekannt, dass sowohl die retinale Größe eines Stimulus, wie auch die aus Erfahrung erwartete Größe eines Objekt bei der Geschwindigkeitsschätzung eine Rolle spielt (Distler, Gegenfurtner, van Veen, & Hawken, 2000; Hershenson & Samuels, 1999), indem die Größe vermutlich den wahrgenommenen Abstand von Objekt zum Beobachter beeinflusst.

Es kann nun nicht ausgeschlossen werden, dass in der hier berichteten Diskriminationsaufgabe die Seite mit der höheren Ortsfrequenz in einer größeren Entfernung gesehen wurde, als die Seite mit der niedrigeren Ortsfrequenz, und dass die Probanden diese Information in ihr Geschwindigkeitsurteil integrierten. Die größere wahrgenommene Distanz wäre dann verantwortlich für die Verschiebung des PSG. Mit dieser alternativen Interpretation hätte man auch keine Schwierigkeiten zu erklären, warum es trotz Augenbewegungen zu einer unterschiedlichen Wahrnehmung der Geschwindigkeit und einer Verschiebung des PSG kommen kann. Die Augenbewegungen könnten lediglich helfen, die Winkelgeschwindigkeit genauer zu ermitteln. Bei der anschließenden Skalierung der Winkelgeschwindigkeit durch den wahrgenommenen Abstand zu einer absoluten Geschwindigkeit würden Augenbewegungen keine Rolle mehr spielen.

Diskussion beider Experimente

Eine gemeinsame Frage beider Experimente war, ob ein Frequenzeffekt in der Geschwindigkeitswahrnehmung zu beobachten ist, wenn die Geschwindigkeit im visuellen Feld durch eine Bewegung in einem 3D-Raum verursacht wird. Frequenzeffekte wurden in der Vergangenheit wiederholt berichtet, jedoch in der Mehrzahl der Experimente unter Verwendung von 2D-Stimuli, d.h. Ortsfrequenzen wurden zwischen einzelnen Präsentationen gewechselt (z.B. durch Darbietung von Sinus-Mustern verschiedener Wellenlängen). Eine Ausnahme bilden die Untersuchungen von Distler, in denen mit dreidimensionalen Stimuli ein eher geringer Frequenzeffekt berichtet wurde (Distler, 2000). Die Untersuchung der Geschwindigkeitswahrnehmung mit dreidimensionalen Stimuli unterscheidet sich von den anderen Arbeiten, da hier innerhalb einer Darbietung gleichzeitig eine ganze Spanne an Ortsfrequenzen zu sehen ist.

Die Ergebnisse des ersten Experiments deuten auf die Abwesenheit eines Frequenzeffektes hin, da die Diskriminationsschwellen mit der simulierten Vorwärtsgeschwindigkeit korrelierten und nicht mit der Orts- und Kontrastfrequenz. Die Resultate des zweiten Experiments dagegen zeigen einen deutlichen Frequenzeffekt, da der Punkt subjektiver Gleichheit davon abhing, ob beide Seiten mit dem gleichen oder unterschiedlichen Muster texturiert waren. Wenn die Ortsfrequenz des Vergleichsreizes erhöht wurde, wurde für die gleiche Geschwindigkeitsempfindung eine niedrigere objektive Geschwindigkeit benötigt. Es ließ sich dabei jedoch keine Veränderung in der Diskriminationsleistung feststellen. Wenn das Geschwindigkeitsurteil auf der Grundlage von sowohl der Geschwindigkeit als auch der Kontrastfrequenz gebildet worden wäre, hätte man im Allgemeinen erwarten können, dass sich die Diskriminationsleistung verschlechtert, was hier jedoch nicht der Fall war. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Befunden von Chen et al. (1998), die diese Dissoziation zwischen der (unveränderten) Diskriminationsleistung und dem (beeinflussten) PSG ebenfalls beobachtet haben. Sie interpretieren den PSG als ein Maß für die wahrgenommene Geschwindigkeit und spekulieren, ob die Dissoziation vielleicht dadurch entsteht, dass die Geschwindigkeitswahrnehmung und die Geschwindigkeitsdiskrimination nicht auf den gleichen Verarbeitungsstufen erfolgt.

Man könnte aus den Ergebnissen des letzten Experimentes folgern, dass die Wahrnehmung der Geschwindigkeit auch bei dreidimensionalen Stimuli, durch die Ortsfrequenz des Stimulus beeinflusst wird. Es ist jedoch nicht klar, ob die veränderten PSG nicht aufgrund eines ungleich empfundenen Abstands beider Wandseiten entstanden sind. Nicht die Kontrastfrequenz hätte dann das Geschwindigkeitsurteil beeinflusst, sondern die unterschiedlichen Ortsfrequenzen selbst würden einen Unterschied in der wahrgenommenen Distanz des Stimulus provozieren. Dadurch dass die Aufgabe einen simultanen Vergleich beider Seiten verlangte, kann die Wahrnehmung scheinbar unterschiedlicher Distanzen noch begünstigt worden sein. Unter diesem Ansatz steht auch eine unveränderte Diskriminationsleistung mit einem verschobenen PSG nicht im Widerspruch. Eine gleichbleibende Diskriminationsleistung zeigt an, dass die wahrgenommene Winkelgeschwindigkeit des Stimulus nicht von der Ortsfrequenz und der Kontrastfrequenz abhängt. Wenn die Winkelgeschwindigkeit anschließend mit einem größeren Abstand verrechnet wird, resultiert eine höhere absolute Geschwindigkeit und folglich eine Verschiebung des PSG, die nicht notwendigerweise von einer Erhöhung der Unterscheidungsschwellen begleitet werden muss.

Man muss an dieser Stelle auch auf einige Unterschiede zwischen den beiden hier vorgestellten Experimenten hinweisen. Im ersten Experiment, in welchem die Unterscheidungsschwellen untersucht wurden, wurden keine unterschiedlichen Muster mit gleicher Geschwindigkeit verglichen, so dass keine Aussage über eine mögliche Verschiebung des PSG gemacht werden kann. Durch die unterschiedliche Darbietungsart zwischen den Experimenten, Leinwandpräsentation einerseits und Bildschirmpräsentation andererseits, wurde die Größe der Stimulation im zweiten Experiment drastisch reduziert. Die Verringerung des Blickbereiches von 180° auf 27° reduzierte auch die maximale Referenzreizgeschwindigkeit von 114 bzw. 228 $^\circ/s$ auf 5 $^\circ/s$, bei ansonsten vergleichbaren Stimulusparametern. Vor allem der kleinere Blickbereich im zweiten Experiment, der die Begrenzung der Anzeige näher in Richtung des zentralen Blickfeldes rückte, kann einen Einfluss der Kontrastfrequenz gefördert haben. Die Versuchspersonen könnten durch die Frequenz, mit der einzelne Texturstreifen an den Rändern des Bildschirms verschwanden, in ihrem Geschwindigkeitsurteil beeinflusst worden sein. Schließlich absolvierten die Versuchspersonen die erste Diskriminationsaufgabe im Anschluss an ein ähnliches Experiment, das ebenfalls die Wahrnehmung der Geschwindigkeit erforderte. Im Vergleich dazu waren die Teilnehmer des zweiten Experiments untrainierter und hatten vielleicht weniger Übung einzig die relevante Größe „Geschwindigkeit“ zu betrachten.

Es ist meine Überzeugung, dass unter optimalen Bedingungen die Winkelgeschwindigkeit an sich wahrgenommen werden kann. Zwar kann man sich in den frühen Stufen der Bewegungsverarbeitung kaum einen anderen Mechanismus vorstellen, der auf etwas anderes als auf die zeitliche Modulation der Helligkeit antwortet, doch für die Wahrnehmung im Gegensatz zur sensorischen Registrierung (Sensation) kann man fordern, dass in nachgeschalteten Verarbeitungsstufen so etwas wie ein reines Geschwindigkeitssignal extrahiert werden sollte. Man kann die Frage zuspitzen, indem man nach dem Nutzen beider Extreme fragt. Was ist sinnvoller für einen biologischen Organismus, die Fähigkeit die Kontrastfrequenz oder die Geschwindigkeit wahrzunehmen? Man kann viele Gründe für die Geschwindigkeit anführen - sie scheint die nützlichere Information in der realen Welt zu sein: Die Kenntnis der Geschwindigkeit eines Objektes ermöglicht die zeitlich korrekte Einleitung einer Fangbewegung, über die Geschwindigkeit kann die Tiefe von Objekte ermittelt werden und wenn der Blick ein Objekt verfolgt, ist es ebenfalls die Geschwindigkeit des Objekts, die die Augenfolgebewegungen bestimmt. Eine Unabhängigkeit der Geschwindigkeitswahrnehmung von räumlichen Eigenschaften des Objektes erscheint desweiteren auch deshalb sinnvoll zu sein, da kaum ein bedeutsamer Zusammenhang zwischen der Größe, der Form oder dem Kontrast eines Objektes und seiner

Geschwindigkeit besteht (McKee et al., 1986). Bewegte Objekte sind schließlich meist „breitbandig“ hinsichtlich ihrer Kontrast- und Ortsfrequenzen. Das bedeutet gleichzeitig, dass ein Mechanismus, der Bewegung registrieren soll, aber nicht fähig ist, Geschwindigkeit zu messen, eine Vielzahl von Kontrastfrequenzen feststellen würde, und nicht einen einzelnen Wert - obwohl das Objekt nur eine Geschwindigkeit besitzt. Schön formuliert haben dies de Graaf et al. (1990): Es wird normalerweise nicht beobachtet, dass die Streifen des Tigers sich schneller zu bewegen scheinen als der Tiger selbst. Es wurde vermutet, dass der Grund, warum dieser eigenartige Eindruck normalerweise nicht auftritt, darin liegt, dass die niedrigen räumlichen Frequenzen die höheren Frequenzen „einfangen“ (motion capture) (Ramachandran & Cavanagh, 1987). Durch einen Mechanismus jedoch, der im Stande wäre, die richtige Geschwindigkeit zu signalisieren, würde dieses (vermeintliche) Problem erst gar nicht entstehen.

Erst seit jüngster Zeit liegen psychophysische und physiologische Nachweise vor, dass geschwindigkeitsgetunte Mechanismen tatsächlich existieren. Reisbeck und Gegenfurtner (1999) bestimmten die Diskriminationsschwellen für bewegte sinusoidale Streifenmuster über eine große Spanne an Orts- und Kontrastfrequenzen. Sie fanden, dass die Orientierung der Diskriminationsschwellenkonturen nach der Geschwindigkeitsachse ausgerichtet ist (ähnlich Abbildung 3.2.b), vor allem bei Geschwindigkeiten über $1^\circ/\text{s}$ (Reisbeck & Gegenfurtner, 1999). Eine Ausrichtung entlang der Geschwindigkeitsachse ist dann aber gleichbedeutend mit einem Mechanismus der sensitiv für eine bestimmte Geschwindigkeit ist. Eine jüngste physiologische Studie ergänzt diese Resultate. Die spektralen rezeptiven Felder einer Anzahl einzelner Neurone im Areal MT des Affenkortex sind ebenfalls in Richtung der Geschwindigkeitsachse ausgedehnt (Perrone & Thiele, 2001). Diese Neurone stellen demnach eine von vielleicht mehreren Instanzen dar, die exklusiv auf die Geschwindigkeit des Stimulus antworten - eine Antwort, die zwangsläufig unabhängig von der Ortsfrequenz des Stimulus ist. Wie es zu der Geschwindigkeitskodierung in diesen Neuronen kommt, ist jedoch noch nicht geklärt.

Bedeutung der Ergebnisse für das Bientunnel-Experiment

Schließlich sollen die Ergebnisse der Diskriminationsexperimente zu einigen offenen Fragen des Bientunnel-Experiments in Beziehung gesetzt werden. Es wurde beispielsweise beobachtet, dass die Standardabweichung der Position im Bientunnel mit zunehmender Vorwärtsgeschwindigkeit ansteigt. Sind schlechtere Unterscheidungsschwellen der Grund für die höhere Variabilität der Steuerung? Die ermittelten Unterscheidungsschwellen schließen eine geringere Diskriminationsleistung als Ursache für diesen Effekt aus: Bei einer hohen Vorwärtsgeschwindigkeit konnten eher geringere

Unterscheidungsschwellen beobachtet werden. Als Alternative dazu kann vermutet werden, dass eine höhere Geschwindigkeit die Wahrnehmung und Verwertung anderer Informationsquellen beeinträchtigt hat. Eine höhere Geschwindigkeit kann sowohl den Vergleich der Ortsfrequenzen, wie auch den Vergleich der Lage der Seitenlinien erschwert haben. Da für die Spurhaltung mehrere Informationsquellen berücksichtigt werden, müsste man bei einer Beeinträchtigung einer oder mehrerer Hinweisreize dann auch eine höhere Ungenauigkeit in der Spurhaltung erwarten.

Welche Schlüsse können aus den Ergebnisse gezogen werden, die durch Manipulation der Ortsfrequenz der Seitenwände erzielt wurden? In den letzten zwei Experimenten konnte nicht beobachtet werden, dass unterschiedliche Ortsfrequenzen der Seitenwände die Diskriminationsfähigkeit beeinflussen. Andererseits gab es eine Beeinflussung der wahrgenommenen Geschwindigkeit, wie sie sich im Punkt subjektiver Gleichheit zeigte. Diesem Befund stehen jedoch die Beobachtungen im Bientunnel-Experiment entgegen. Wenn eine Seite mit einer höheren Ortsfrequenz texturiert war, fuhren die Teilnehmer zu dieser Seite hin, als ob die Entfernung zu dieser Seite größer erschien. Wenn sie nach der wahrgenommenen Geschwindigkeit gehandelt hätten, die bei einer höheren Ortsfrequenz erhöht erschien, hätten die Fahrer sich von der Seite mit der höheren Ortsfrequenz weg bewegen sollen. Demnach scheinen die Fahrer nicht nach der wahrgenommenen Geschwindigkeit gehandelt zu haben, sondern nach der Winkelgeschwindigkeit. Die Spurhaltung im Bientunnel und die Ergebnisse der Diskriminationsexperimente lassen sich dann auf folgende Weise am einfachsten miteinander integrieren: Zur Kontrolle der lateralen Position wird die Winkelgeschwindigkeit beider Seiten benutzt, wobei die Wahrnehmung der Winkelgeschwindigkeit nicht von der Ortsfrequenz des Musters abhängt. Dass Menschen Zugriff auf die Winkelgeschwindigkeit haben, und dass die Diskrimination von Winkelgeschwindigkeiten sogar besser sein kann als die Diskrimination von absoluter objektiver Geschwindigkeit, ist experimentell gezeigt worden (McKee & Welch, 1989). Obendrein wird die Position auch über die Ortsfrequenz des Seitenwandmusters reguliert, wobei eine höhere Ortsfrequenz als weiter entfernt interpretiert wird. Wird dagegen explizit eine Geschwindigkeitsdiskrimination verlangt, dann ist es denkbar, dass die verschiedenen erscheinenden Abstände mit der retinalen Winkelgeschwindigkeit zu einer absoluten Geschwindigkeit verrechnet werden. Auf diese Weise resultiert dann ein Frequenzeffekt in der wahrgenommenen Geschwindigkeit.

Es soll hervorgehoben werden, dass eine unverfälschte Wahrnehmung der Geschwindigkeit, sowohl der Winkelgeschwindigkeit wie auch der absoluten Geschwindigkeit, bei manchen Aufgaben allerdings nicht unbe-

dingt notwendig ist. Dies kann auch für die Positionskontrolle in einem Korridor gelten. Prinzipiell genügt für diese Aufgabe die Wahrnehmung von *Geschwindigkeitsunterschieden*. Wird ein Unterschied wahrgenommen, wird so lange die Position verändert, bis der Geschwindigkeitsunterschied verschwindet. Damit in Übereinstimmung, zeigten sich signifikante Korrelationen zwischen einigen Fahrleistungsparametern und den individuellen Weber-Quotienten in der Diskriminationsaufgabe. Bei einer besseren Diskriminationsfähigkeit wurde eine Position im Korridor eingenommen, an der die Wandgeschwindigkeiten sich weniger unterschieden.

Die Nützlichkeit der Geschwindigkeitsinformation in einer solchen Aufgabe kann auch nicht durch solche Argumente relativiert werden, dass während anhaltender Betrachtung eines bewegten Stimulus eine Adaptation auf den Stimulus stattfindet und die wahrgenommene Geschwindigkeit sich allmählich reduziert (Smith, 1987). Es wurde gezeigt, dass dieser Verlust der akkuraten Geschwindigkeitsrepräsentation sogar von Vorteil sein kann, da dabei die Sensitivität für Geschwindigkeitsunterschiede erhöht wird (Clifford & Wenderoth, 1999). Diese funktionale Adaptation ähnelt dann der Helligkeitsadaptation des visuellen Systems, welches die Repräsentation der durchschnittlichen Helligkeit einbüßt, aber dafür Helligkeitsunterschiede über einen sehr großen Helligkeitsbereich zuverlässig diskriminiert werden können.

FAHRFEHLER UNTER FALSCHEM FLUSS

Verschiedene Hinweisreize wurden für die Kontrolle der Lokomotion vorgeschlagen. In diesem Kapitel wird die Rolle des optischen Flusses untersucht, der als die bedeutsamste Quelle gilt, um die aktuelle Bewegungsrichtung (Heading) zu bestimmen. Richtungsschätzungen auf der Basis von optischem Fluss sind innerhalb einer stationären Umwelt gut untersucht. Weniger gut untersucht, ist die Fähigkeit die Bewegungsrichtung zu schätzen, wenn sich gleichzeitig Objekte im visuellen Feld bewegen.

Durch Manipulation des optischen Flusses sollte die Bedeutung dieses Hinweisreizes für die Kontrolle der Fahrzeugsteuerung überprüft werden. Durch Objektbewegung wurde deshalb die radiale Struktur des optischen Flusses, wie sie bei einer linearen Bewegung entsteht, gestört. Die Fahrer sahen sich konfrontiert mit einer lateralen, großflächigen Bewegung in Form eines Schneefeldes, wie sie bei einem Schneesturm auftreten kann (Exp. 1), oder einer großflächigen Bewegung eines Vogelschwarms (Exp. 2), während sie ein virtuelles Fahrzeug in der Mitte einer Straße lenken sollten. Es wurde erwartet, dass sich systematische Änderungen in den Fahrspuren zeigen sollten, falls der optische Fluss und die daraus ermittelte Schätzung der Headingrichtung für den Fahrer eine kritische Information darstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein systematisches Lenkverhalten aufgrund der lateralen Bewegung eines Schneefeldes oder eines Vogelschwarms eintritt. Die Richtung des systematischen Fehlers ist jedoch inkompatibel mit Voraussagen eines Modells, nach welchem eine Headingschätzung vor einer Segmentierung der Szene in bewegte und unbewegte Objekte stattfindet (Warren & Saunders, 1995).

Schneesturm

Von A nach B zu gelangen und dabei Hindernisse zu umgehen, ist eine Fähigkeit, die für alle sich bewegenden Lebewesen notwendig ist. Im Ver-

gleich zu anderen Sinnesmodalitäten ist die akustische und die visuelle Modalität besonders für die Kontrolle der Eigenbewegung geeignet, da beide Informationen liefern, die auch aus fernen Bereichen der Umgebung stammen. Abgesehen von der Echoortung bei einigen Spezies, ist es das visuelle System, welches für die Kontrolle der Lokomotion verwendet wird. Nicht nur für den Menschen ist es außerordentlich schwierig mit geschlossenen Augen zu gehen. Zwar können Menschen auf kontinuierliche visuelle Rückmeldung verzichten und sich mit einer memorierten Repräsentation der gegenwärtigen Umgebung behelfen, dies aber nur über eine verhältnismäßig kurze Zeitdauer (Thomson, 1983).

Aufgrund welcher visueller Information können wir unsere Fortbewegung kontrollieren? Eine der Antworten, die auf diese Frage geliefert wurde, ist einfach: Es ist der optische Fluss, die optische Transformation der sichtbaren Oberflächen der Umgebung während der Fortbewegung (Gibson, 1966). Angenommen ein Individuum bewegt sich geradlinig durch seine Umwelt, dann produziert diese Bewegung ein strukturiertes Muster im optischen Fluss, in dem ein einzelner Punkt enthalten ist, an dem keine Bewegung vorliegt - dem *Expansionsfokus* des optischen Flussfelds (FOE, focus of expansion). Die *Lage* dieses FOE zeigt dem Individuum an, in welche Richtung es sich gegenwärtig bewegt (Heading oder Headingrichtung). Wie wird nun die Bewegungsrichtung kontrolliert? Ebenso simpel: Stimmt die Lage des FOE mit der Lage eines anvisierten Ziels nicht überein, wird die Richtung der Bewegung verändert, bis FOE und Ziel zur Deckung gebracht sind. Auf diese Weise können auch Hindernisse umgangen werden. Hier muss nur vermieden werden, dass der FOE des optischen Flussfelds und das zu vermeidende Hindernis übereinstimmen.

Welche Evidenzen liegen dafür vor, dass eine solche einfache Strategie für die Kontrolle beim Fahren benutzt wird? Es gab nur wenige Experimente in diese Richtung, die auch eher wenig Anhaltspunkte liefern konnten. Die Detektion einer lateralen Versetzung in einer nur durch Zufallspunktemuster spezifizierten Umgebung erfordert so große Versetzungen, dass sie für eine ausreichende Performanz in einer realen Situation nicht zu gebrauchen ist (Riemersma, 1981). Beusmans untersuchte das Fahrverhalten in einer simulierten Umgebung, in der die Bodentextur der Straße in lateraler Richtung oszillierte. Es wurde erwartet, dass diese Oszillation unmittelbar die Headingschätzung beeinflusst, und sich diese in der Lenkreaktion wieder finden lässt. Es konnte jedoch keine Korrelation zwischen der Bewegungsrichtung der Bodentextur mit dem Lenkverhalten festgestellt werden (Beusmans, 1995). Dagegen zeigte sich, dass die Position und Ausrichtung der Seitenlinien im visuellen Feld für den Fahrer äußerst wichtig sind (Beall & Loomis, 1996). Die Lage der Seitenlinien gehören zu den piktorischen (im sta-

tischen Bild vorkommenden) Hinweisreizen, die, wenn die Seitenlinien nicht unterbrochen sind, keinerlei optische Flussinformation liefern. Abgesehen von Fahraufgaben, ließen sich auch bei anderen Arten von Eigenbewegungen wenig stichhaltige Nachweise finden. Noch 1994 wurde dieser Zustand so beschrieben: „Psychophysical studies in broad outline confirmed Gibson’s imaginative hypotheses, showing that observers can sense their own direction of motion in a computer simulated display (...) As yet, however, researcher have not gone beyond these psychophysical observations to show that humans or animals actually use this information to perform real locomotor tasks” (Nakayama, 1994, S. 332).

Die negativen bzw. fehlenden Evidenzen begründen sich zum Teil darin, dass die Forschung sich zunächst lange Zeit mit der psychophysischen Bestimmung der Headingschätzung beschäftigt hat, und Experimente mit „aktiver“ Lokomotion, nicht zuletzt auch wegen des starken apparativen Aufwands, zeitlich hinten angestellt wurden. Erst in jüngster Zeit sind die Fragen zur Nutzung des optischen Flusses für die Kontrolle der Eigenbewegung systematisch angegangen worden und kritisch betrachtet worden (Rushton et al., 1998; Warren et al., 2001; Wood et al., 2000). Ein Argument gegen die Nutzung des optischen Fluss war die Frage, wie sich Menschen bewegen könnten, wenn optischer Fluss minimal sei, wie bei Dämmerung, oder warum es nicht zu einer vollkommenen Desorientierung führt, wenn der optische Fluss nicht valide ist, wie in einer Situation, in der Schneefall herrscht (Harris & Rogers, 1999).

Die folgenden Experimenten bauen auf genau dieser letzte Frage auf. Ist es tatsächlich so, dass es nicht zu einer Desorientierung oder systematischen Fehlern in der Bewegung kommt, wenn der optische Fluss für die Aufgabe nicht valide ist? Betrachten wir das Schneefallbeispiel. Wenn während des Fahrens oder Laufens, Schnee senkrecht auf den Boden niedersinkt, wird optischer Fluss generiert, der in Abhängigkeit von der Schneefall- und Bewegungsgeschwindigkeit einen FOE besitzt, welcher mehr oder weniger vertikal über der Augenhöhe des Betrachters liegt. Ein FOE, erzeugt durch einen beliebigen Schneefall, soll im weiteren, da er für die Aufgabe der Lokomotion nicht wesentlich ist, als irrelevanter Expansionsfokus (iFOE) bezeichnet werden. Außer dem optischen Fluss des Schnees, liegt noch optischer Fluss des Bodens und der restlichen stationären Umweltelemente vor. Dieser wird allein durch die Vorwärtsbewegung des Betrachters bestimmt. Man würde in dieser Schneefallsituation keine systematische Beeinflussung der Bewegungsrichtung des Beobachters erwarten: Das Flussfeld der Schneebewegung zeigt eine Bewegungsrichtung schräg nach oben an, dessen horizontale Richtung jedoch mit der Bewegungsrichtung übereinstimmt, welche vom Flussfeld des Bodens angezeigt wird. Ein Konflikt zwischen bei-

den angezeigten Bewegungsrichtungen besteht nur in vertikaler Richtung und man könnte höchstens erwarten, dass es zu unsystematischen Fehlern kommt, zum Beispiel zu einer höheren Variabilität des Lauf- oder Fahrweges.

Im Fall eines Schneefeldes allerdings, das zusätzlich noch eine laterale Bewegungskomponente senkrecht zur Bewegungsrichtung des Beobachters hat, wird eine Headingrichtung angezeigt, die abseits der tatsächlichen Bewegungsrichtung liegt. Dies entspricht einer Situation, bei der Schneefall noch durch Seitenwind seitlich getrieben wird. In diesem Fall könnte der Beobachter diese widersprüchliche Information durch das Schneefeld einfach ignorieren, und es sollte nicht zu einer Beeinflussung kommen. Würde der von der Schneefeldbewegung angezeigte iFOE allerdings doch zu einem gewissen Grad berücksichtigt werden, würde man eine inkorrekte Schätzung der Bewegungsrichtung erwarten. In welche Richtung würde der Fehler gehen? Das Ergebnis hängt davon ab, welche Verarbeitungsstufen dem Prozess der Headingschätzung unterliegen. Eines der einfachsten Modelle, welches Aussagen über diesen Prozess macht, ist das Modell der räumlichen Summation (*spatial pooling hypothesis*). Nach diesem Modell wird die Headingrichtung durch Einbeziehung der gesamten visuellen Szene berechnet (Warren & Saunders, 1995). Die Flussvektoren, ungeachtet dessen, ob sie von der stationären Szene oder den darin sich bewegenden Objekten stammen, werden zur Berechnung der Bewegungsrichtung herangezogen, und erst nach dieser Verarbeitungsstufe wird die Szene in unterschiedliche Oberflächen und Objekte segmentiert. Nach diesem Modell würde man erwarten, dass die inkorrekte Schätzung in Richtung des durch das Schneefeld verursachten iFOE geht, also entgegen der Schneefeldbewegung. Diese Vorhersage ist eine direkte Folge der Summation beider Flussfelder, dem Flussfeld des Grundes und dem des Schneefeldes. Die geschätzte Bewegungsrichtung würde dann irgenwo zwischen den Richtungen liegen, die jedes einzelne Flussfeld für sich alleine spezifiziert. Würde dagegen zuerst bestimmt werden, wo sich bewegte Objekte in der visuellen Szenen befinden, so dass ihr Beitrag am optischen Fluss für die Headingbestimmung unberücksichtigt bliebe, dürften keine systematischen Fehler zu verzeichnen sein.

Zwei Studien beschäftigten sich mit der Frage, ob bewegte Objekte in einer ansonsten stationären Szene, die Headingschätzung beeinflussen (Royden & Hildreth, 1996; Warren & Saunders, 1995). Beide Studien finden eine kleine Beeinflussung des Headingurteils, jedoch nur dann, wenn bewegte Objekte den FOE der Szene verdecken, also die momentane Bewegungsrichtung des Beobachters kreuzen. Die Studien unterscheiden sich allerdings in der beobachteten Richtung des Headingfehlers. Warren und Saunders (1995) berichten von einem Fehler (1° - 3°), der gegen die Bewegungsrichtung des

Objektes gerichtet ist. Die Autoren sehen darin eine Bestätigung des Modells der räumlichen Summation. Eine Oberflächen- und Objektsegmentierung findet demnach vor der Richtungsschätzung nicht statt (Warren & Saunders, 1995). Royden und Hildreth (1996) dagegen finden, dass ein meist kleiner Headingfehler ($< 1^\circ$) in Richtung der Objektbewegung zeigt. Die Unterschiede zwischen beiden Studien wurden durch die Unterschiede in der Objektbewegung erklärt (Royden & Hildreth, 1996). In der Studie von Royden und Hildreth hatte das Objekt einen konstanten Abstand zum Beobachter, wohingegen das Objekt bei Warren und Saunders sich auf den Beobachter zu bewegte, und somit einen eigenen FOE produzierte. Es wurde vermutet, dass aufgrund der räumlichen Nähe des FOE des Objekts und des FOE der stationären Szene (ca. 6°), das visuelle System veranlasst wurde, beide FOEs zu mitteln. Die Befunde beider Studien wurden entsprechend unterschiedlich interpretiert. Während einerseits aufgrund des nur geringen Fehlers die Robustheit der menschlichen Headingschätzung betont wurde (Hildreth & Royden, 1998), hoben andere die Übereinstimmung mit dem Modell der räumlichen Summation hervor, welches gerade diese Art von Richtungsfehler vorhersagt (Vaina & Rushton, 2000; Warren & Saunders, 1995).

Voraussagen aus den Arbeiten zur Headingschätzung für die Kontrolle der Bewegung zu treffen ist aus mehreren Gründen schwierig. Die Richtung der Headingfehler war nicht konsistent. Die Objekte, deren Bewegung die Struktur des relevanten Flussfeldes perturbierte, nahmen einen kleinen, umgrenzten Bereich im visuellen Feld ein. Schließlich ist unklar, ob sich ein beobachteter Fehler bei einer Headingschätzung auch notwendigerweise in einer Änderung der Bewegungsrichtung niederschlagen muss. Denn es ist denkbar, dass man sich je nach Aufgabe, auf andere Hinweisreize verlässt, oder, wenn für die Headingschätzung der optische Fluss eine von mehreren Informationsquellen darstellt, das Gewicht der anderen Informationsquellen überwiegt.

Das Ziel dieses Experimentes war es, eine mögliche Beeinflussung durch eine laterale Schneefeldbewegung in einer Fahraufgabe zu untersuchen. Eine laterale Schneefeldbewegung wurde gewählt, da sie auch in einer realen Fahrsituation in ähnlicher Weise vorkommen kann, und das Experiment somit ausreichend ökologische Validität besitzt. Die Arbeitshypothese wurde auf dem Modell der räumlichen Summation gebildet. Danach sollte eine laterale Schneefeldbewegung dazu führen, dass Fahrer einen Fehler in der Schätzung ihrer Bewegungsrichtung begehen, welche der Bewegungsrichtung des Schneefeldes *entgegen* liegt. Dieser Headingfehler sollte die Fahrer veranlassen eine Korrektur einzuleiten, mit dem Ergebnis, dass sie

ihre Position auf der Straße in Richtung der Schneefeldbewegung verändern.

Methoden

Elf Personen im Alter zwischen 19 und 37 Jahren (Mittelwert 25.2) nahmen an diesem Experiment teil. Alle hatten einen Pkw-Führerschein und sieben Teilnehmer nutzten ein Kraftfahrzeug mehrmals in der Woche. Die Probanden erhielten eine Vergütung für ihre Teilnahme von 15 DM/h.

Aufgabe

Die Teilnehmer fuhren auf einer geraden Straße mit konstanter Geschwindigkeit und sollten mit Hilfe eines Lenkrads (siehe auch Anhang 1) genau in der Mitte der Straße fahren. Auftretende Abweichungen von der Straßenmitte sollten sie möglichst zügig und genau korrigieren.

Visuelle Stimuli

Die Szene bestand aus einer 3.5 m breiten, grau texturierten Straße mit weißen Seitenlinien. Die Straße war eingebettet in einer braun und schwarz texturierten, flachen Landschaft und wurde von einem orange-schwarzen Himmel umgeben (siehe Abbildung 4.1.). Die Textur des Himmels war in einer solchen Entfernung platziert (~ 5 km), dass bei der Vorwärtsbewegung keine nennenswerte Expansion zu sehen war.

Schneefall wurde durch ein Punktevolumen simuliert, die sich mit einem Zehntel der Vorwärtsgeschwindigkeit des Fahrers nach unten bewegte. Die Punktevolumen bestand aus 5000 weißen Punkten, die in einem Quader mit einer Ausdehnung von 500 x 800 x 100 m (Breite, Tiefe, Höhe) zufällig positioniert wurden. Der Durchmesser der Punkte variierte zwischen einen bis maximal acht Pixel und war innerhalb dieser Grenzen invers proportional zur Entfernung vom Beobachter. Bei geradliniger Fahrt durch dieses Schneefeld wurde ein Expansionsfokus erzeugt, der 5.7° über dem Horizont lag. Die Einzelpunkte konnten in diesem Volumen zusätzlich lateral bewegt werden. Dabei wurde die laterale Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit so gewählt, dass dabei ein Expansionsfokus des Schneefeldes entstand, der in einem horizontalen Winkel von 15°, 30° oder 45° zur Geradeausrichtung lag.

Die Begrenzung des Punktevolumens wurde mit der longitudinalen Position des Fahrers mitbewegt. Wenn sich ein Punkt aus dem Volumen heraus bewegte, entweder weil er den Grund erreichte, lateral das Volumen verließ, oder sich am Fahrer vorbei bewegte, wurde er durch einen neuen, an einer zufälligen Position an der gegenüberliegenden Seite des Punktevolumens ersetzt.

mens ersetzt. Der Großteil des Punktevolumens befand sich oberhalb des sichtbaren Horizonts. Die Höhe des Horizontes auf der Projektion war bei 1.25 m und entsprach der Augenhöhe eines sitzenden Betrachters. Nur ein kleiner Teil des Schneevolumens von durchschnittlich 1.25% lag unterhalb des Horizonts.

Die Aktualisierungsrate der Simulation erreichte 36 Hz. Die Szene wurde auf einer 3.5 m entfernten Leinwand dargestellt, mit einem sichtbaren Bereich von 60° horizontal und 55° vertikal.

Versuchsbedingungen

Jede Durchfahrt dauerte 25 Sekunden. Nach den ersten 5 Sekunden jeder Fahrt wurde in unregelmäßigen Intervallen die Darstellung für ca. 250 ms verdunkelt, pro Durchgang 8 mal. Im Mittel wurde eine Verdunkelung alle 2.5 Sekunden eingeführt. Die Intervalle dazwischen variierten zufällig. Während einer der ersten sechs Verdunkelungen wurde die experimentelle Störung eingeführt, so dass diese im Intervall 5 bis 20 Sekunden nach Durchgangsbeginn lag. Die Störung gehörte in jeweils einem Drittel der Durchgänge zu einer von drei Pertubationsklassen. Die Fahrer wurden entweder (a) auf der Straße lateral versetzt, (b) die virtuelle Kamera auf die Szene wurde rotiert, oder (c) die laterale Schneefeldbewegung setzte ein.

Die Verdunkelung sollte das Einsetzen der Perturbation maskieren: Die unregelmäßigen Intervalle der Verdunkelung sowie die zufällige Darbietung während einer von sechs Dunkelperioden sollte Unsicherheit über den Zeitpunkt der Perturbation schaffen. Die laterale Versetzung von 0.45, 1.05 oder 2.17 m nach links oder rechts der aktuellen Position war die einzige Bedingung, die eine Korrektur im Sinne der Aufgabe erforderte. Die virtuelle Kamerarotation (5°, 10° und 15°) und die Schneefeldbewegung veränderten die Position auf der Straße nicht. Demnach erforderten diese Perturbationen im Sinne der Aufgabenstellung keine Korrekturen. Auf die Effekte der virtuellen Kamerarotation und der lateralen Versetzung wird nicht eingegangen, sie wurden anderswo erörtert (Chatziastros, Cunningham, & Bühlhoff, 2000). Diese Bedingung wird hier lediglich aufgeführt, um das Versuchsdesign vollständig zu beschreiben.

Jeder Teilnehmer absolvierte 108 Durchfahrten, die auf drei Blöcke aufgeteilt wurden. Die 36 Durchgänge mit Schneefeldbewegung waren eine vollständige Kombination folgender Faktoren: 3 Versuchsblöcke, 2 Geschwindigkeiten (30 und 60 km/h), 3 Exzentrizitäten des Expansionsfokus des Schneefelds (iFOE-Exzentrizität von 15°, 30° und 45°), 2 Richtungen des irrelevanten Expansionsfokus (iFOE links oder rechts der Straße). In 36 Durchgängen war eine Kamerarotation zu sehen, und in weiteren 36 Durchgängen erfuhren die Teilnehmer ein laterale Versetzung.

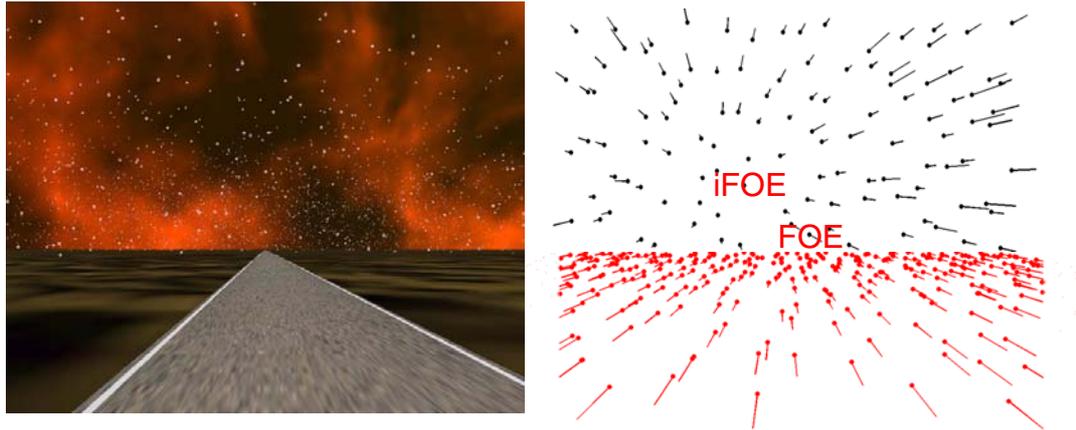


Abbildung 4.1. Ansicht der experimentellen Szene. Links: Virtuelle Umgebung der Fahrsimulation. Rechts: Optisches Flussfeld während gerader Fahrt. Die untere Hälfte des Punktemusters (Grund) expandiert aus der Mitte des Bildes (relevanter Expansionsfokus, FOE). Aufgrund der abwärtsgerichteten und seitlichen Bewegung des Schneevolumens nach rechts, expandiert das Punktevolumen in der oberen Hälfte aus einer Stelle, die oberhalb und links von der Bildmitte liegt (irrelevanter Expansionsfokus, iFOE).

Durchführung

Alle Teilnehmer absolvierten eine kleine Anzahl an Probefahrten (ca. zwei bis fünf), um sich an die Lenkradsteuerung zu gewöhnen. Während dieser Probefahrten kamen keine Perturbationen vor. Die möglichen Perturbationen wurden während der Probefahrten jedoch mündlich beschrieben. Gleichzeitig wurden die Versuchspersonen aufgefordert, in den anschließenden experimentellen Durchgängen nur dann zu reagieren, wenn sie den Eindruck hätten, nicht mehr in der Mitte der Straße zu fahren.

Die experimentellen Durchgänge wurden in drei Blöcken absolviert, mit dazwischenliegenden Pausen von ca. 5-10 min. Jede Durchfahrt wurde von der Versuchsperson durch Knopfdruck auf einer Tastatur ausgelöst. Der befahrbare Bereich der Landschaft war auf ± 2.5 m von der Straßenmitte beschränkt, d.h. man konnte sich maximal 1.25 m von der Straße entfernen. Dies sollte den wenig wahrscheinlichen Fall verhindern, dass eine solche Abweichung von der Straße entsteht, dass die Teilnehmer die Sicht auf die Straße verlieren.

Auswertung und Analyse

Die Daten einer Versuchsperson wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Person zeigte über den Verlauf des Experiments eine sehr unsichere Fahrweise. Eine nachfolgende Betrachtung der Positionsdaten zeigte, dass sie in 23 Durchfahrten mindestens einmal die maximale laterale Abweichung von 2.5 m von der Mitte der Straße erreichte.

Für die Datenanalyse wurde für jeden Durchgang die Abweichung nach dem Einsetzen der Verdunkelung (Okklusionsbeginn), auf welche die Perturbation folgte, berechnet. Da die letzte Okklusion noch 5 s vor Durchgangsende sein konnte, wurde als Abweichung die Differenz zwischen der lateralen Position zum Zeitpunkt der Okklusion und der lateralen Position 5 s später gebildet. Diese Werte wurden dann einer vier-faktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung unterzogen.

Ergebnisse

Die mittlere Position der Fahrer nach Einsetzen der Schneefeldbewegung veränderte sich deutlich. In Abbildung 4.2. sind die Zeitverläufe der mittleren Abweichungen, getrennt nach der Seite des irrelevanten Expansionsfokus (iFOE) des Schneefeldes aufgetragen. Wenn der Expansionsfokus links von der Fahrtrichtung lag, weil sich das Schneefeld von links nach rechts bewegte, steuerten die Fahrer nach links (Abbildung 4.2., Quadrate). Bereits drei Sekunden nach dem diese laterale Schneefeldbewegung zum ersten Mal auftrat, war ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Richtungsbedingungen zu sehen. Die Varianzanalyse bestätigte diesen Effekt der Richtung des iFOE, $F(1,9) = 144.66, p < 0.001$. Zwei weitere Faktoreninteraktionen wurden signifikant. Die Interaktion zwischen Richtung des iFOE und der Geschwindigkeit, $F(1,9) = 11.17, p = 0.009$ und die Dreifach-Interaktion zwischen Versuchsblock, iFOE-Exzentrizität und Richtung des iFOE, $F(4,36) = 2.99, p = 0.032$.

Wenn die Exzentrizität des Expansionsfokus oder der Versuchsblock einen differenziellen Einfluss auf die Position gehabt hätten, dann hätte man eine Interaktion zwischen einem dieser Faktoren mit dem Faktor Richtung des iFOE erwarten dürfen. Diese Interaktionen waren alle nicht signifikant.

Die Interaktion zwischen Richtung des iFOE und der Geschwindigkeit, bedeutet, dass bei unterschiedlichen Vorwärtsgeschwindigkeiten der Fahrer unterschiedliche Abweichungen resultierten. Wie in Abbildung 4.3. verdeutlicht, produzierten die Fahrer bei der höheren Geschwindigkeit von 60 km/h auch höhere Korrekturen in Richtung des iFOE. In dieser Abbildung sind die Werte auch über die Versuchsblöcke aufgetragen, um die Stabilität des Effektes zu zeigen (mit dem Faktor Versuchsblock bestand keine Interaktion). Bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h resultierte eine mittlere Abweichung (über linke und rechte Richtung gemittelt) von 0.258 m, während bei 30 km/h nur 0.088 m zu beobachten waren.

Die Interaktion zwischen Versuchsblock, iFOE-Exzentrizität und Richtung des iFOE ist in Abbildung 4.4. dargestellt. Wie dort zu sehen ist, weicht der Datenpunkt bei 15° Exzentrizität des iFOE im letzten Versuchsblock mit

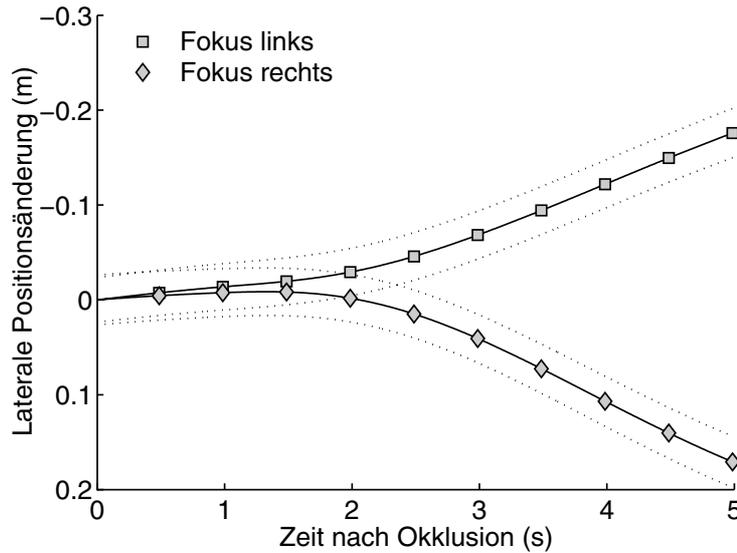


Abbildung 4.2. Laterale Position nach Einsetzen der seitlichen Schneefeldbewegung, getrennt nach der Lage des irrelevanten Expansionsfokus. Wenn der Expansionsfokus links ist, geht die Schneefeldbewegung nach rechts. Man beachte, dass die Ordinatenrichtung invertiert wurde, um mit positiven Werten eine Abweichung nach rechts anzuzeigen. Gepunktete Linien entsprechen ± 1 Standardschätzfehler des Mittelwerts der lateralen Position.

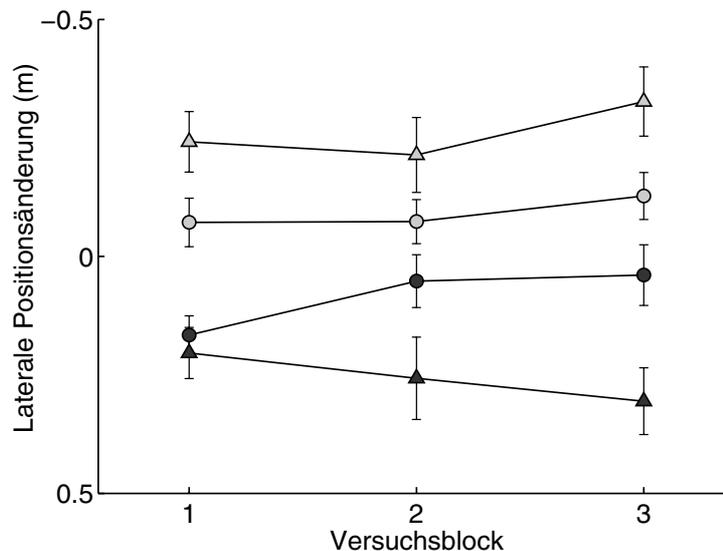


Abbildung 4.3. Interaktion zwischen Geschwindigkeit und Richtung des irrelevanten Expansionsfokus. Helle (dunkle) Markierung stellen die Mittelwerte der Bedingungen, in denen der iFOE links (rechts) von der Fahrtrichtung lag. Geschwindigkeiten: ● = 30 km/h, ▲ = 60 km/h.

einer stärkeren Abweichung von den anderen Mittelwerten ab. Eine stichhaltige Erklärung oder auch nur ein sinnvolle Interpretation für diesen Befund kann hier nicht gegeben werden. Für die Interpretation der Befunde spielt diese Interaktion nur eine untergeordnete Rolle, da auch diese „abwei-

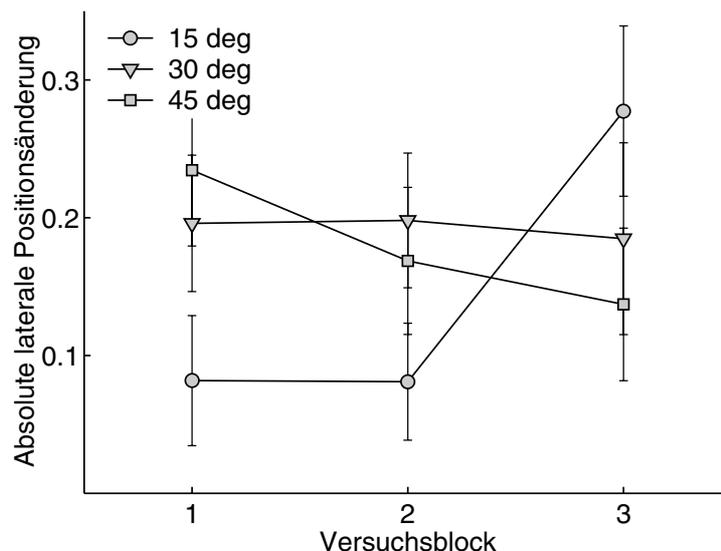


Abbildung 4.4. Mittelwerte und ihre Standardschätzfehler der Interaktion zwischen Versuchsblock und der Exzentrizität des irrelevanten Expansionsfokus (iFOE). Die Werte stellen die absoluten Abweichungen während eines 5-Sekundenintervalls dar und wurden über die Richtung des Expansionsfokus gemittelt.

chende Abweichung“ konsistent in die Richtung des irrelevanten Expansionsfokus weist.

In einer weiteren Analyse wurde untersucht, welchem Winkel die beobachteten lateralen Abweichung von der Geradeausfahrt entsprachen (Headingfehler). Dazu wurden aus den individuellen Verläufen zwei Maße der *lateralen Geschwindigkeit* berechnet. Die *maximale* laterale Geschwindigkeit lieferte ein Maß für die maximale Korrektur in jedem Durchgang. Die *durchschnittliche* laterale Geschwindigkeit wurde aus der Positionsdivergenz zwischen der dritten und fünften Sekunde nach dem Einsetzen der Schneefeldbewegung ermittelt, und gab an, wie stark die Korrektur in einer über alle Personen betrachtet konstanten Phase der seitlichen Bewegung war (siehe auch Abbildung 4.2.). Die lateralen Geschwindigkeiten wurden auf die Vorwärtsgeschwindigkeit bezogen, und der Headingfehler zur Geradeausfahrt berechnet (siehe Tabelle 4). Dabei konnte erwartet werden, dass beide Maße, der maximale und der durchschnittliche Headingfehler, miteinander einen gewissen Zusammenhang aufweisen würden.

Die Headingfehler wurden ebenfalls varianzanalytisch auf Unterschiede geprüft, und zwar hinsichtlich eines Effektes der Faktoren Versuchsperson, Geschwindigkeit, Richtung des iFOE und iFOE-Exzentrizität. Die Headingfehler bei einem linksseitigen iFOE wurden gespiegelt, um dessen Betrag mit dem bei einem rechtsseitigen iFOE direkt vergleichen zu können. Die maximalen Headingfehler unterschieden sich weder innerhalb des Faktors Geschwindigkeit, $F(1,9) = 3.43$, $p = 0.097$, noch innerhalb des Faktors Rich-

tung des iFOE, $F(1,9) = 1.27$, $p = 0.289$, voneinander. Die Exzentrizität des iFOE war ebenfalls nicht signifikant, $F < 1$. Es ließ sich jedoch ein Unterschied zwischen den Versuchspersonen finden, der anzeigt, dass die Probanden unterschiedlich stark auf die Schneefeldbewegung reagierten, $F(1,9) = 151.40$, $p \ll 0.001$.

Variable	V_{long}	iFOE	V_{lat} (m/s)	Headingfehler (°)
Maximale laterale Geschwindigkeit	60 km/h	L	-0.189	0.649
		R	0.158	0.543
Maximaler Headingfehler	30 km/h	L	-0.091	0.627
		R	0.093	0.640
Durchschnittliche laterale Geschwindigkeit	60 km/h	L	-0.077	0.263
		R	0.091	0.312
Durchschnittlicher Headingfehler	30 km/h	L	-0.031	0.212
		R	0.039	0.270

Tabelle 4 Laterale Geschwindigkeiten V_{lat} und korrespondierender Headingfehler von der Geradeausfahrt in Abhängigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit V_{long} und Lage des irrelevanten Expansionsfokus (iFOE) der Schneefeldbewegung. Der maximale Headingfehler im Zeitraum 0-5 s nach Einsetzen der seitlichen Schneefeldbewegung beträgt über die Bedingungen gemittelt 0.615° . Der durchschnittliche Headingfehler wird berechnet anhand der durchschnittlichen lateralen Geschwindigkeit im Zeitraum 3-5 s nach dem Einsetzen der seitlichen Schneefeldbewegung, und liegt bei 0.264° .

Bei den durchschnittlichen Headingfehlern zeigte sich ein ähnliches Ergebnis wie bei den maximalen Headingfehlern. Auch hier waren die Faktoren Geschwindigkeit, $F(1,9) = 2.19$, $p = 0.174$ und Richtung des iFOE, $F(1,9) = 1.74$, $p = 0.220$, statistisch nicht bedeutsam, ebenso wie die iFOE-Exzentrizität, $F < 1$. Innerhalb der Versuchspersonen lag auch hier ein großer Unterschied in der Reaktion vor, $F(1,9) = 78.34$, $p \ll 0.001$. Der erwartete Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen und maximalen Headingfehlern zeigte sich in der Korrelation von $r = 0.44$.

Diskussion

Die Rolle des optischen Flusses für die Spurhaltung wurde getestet, in dem im oberen Gesichtsfeld eine seitliche Schneefeldbewegung während einer Fahrt auf einer geraden Straße simuliert wurde. Die Voraussage nach dem Modell der räumlichen Summation ist, dass aufgrund der seitlichen Schneefeldbewegung die Fahrer zu einer fehlerhaften Headingschätzung gelangen sollten. Die momentane Fahrtrichtung würde in Richtung des Expansionsfokus des Schneefeldes weisen. Würde der Fahrer diese Hea-

dingschätzung umsetzen, sollten Lenkkorrekturen in entgegengesetzter Richtung zur Lage des iFOE zu beobachten sein. Die Position der Fahrer sollte sich in der Folge in Richtung der Schneefeldbewegung verändern. Man würde dagegen keine Positionsänderungen erwarten, wenn (a) eine Einschätzung der Bewegungsrichtung über das optische Flussfeld für die Fahraufgabe nicht benötigt wird, weil beispielsweise die Orientierung an den Seitenlinien ausreicht, (b) für die Headingschätzung nur Teilbereiche des visuellen Feldes herangezogen werden - hier würde sich anbieten nur optischen Fluss im unteren Gesichtsfeld zu betrachten, oder (c) das Modell der räumlichen Summation nicht korrekt ist. Entgegen den Erwartungen, wurde eine systematische Abweichung *in Richtung* des irrelevanten Expansionsfokus beobachtet. Die Abweichung trat verhältnismäßig schnell auf, und die laterale Position unterschied sich spätestens drei Sekunden nach dem Einsetzen der seitlichen Schneefeldbewegung.

Größe des Headingfehlers

Die Stärke der Abweichung hing ferner von der Vorwärtsgeschwindigkeit ab. Bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h wurden höhere Abweichungen beobachtet als bei 30 km/h. Betrachtet man die Abweichung allerdings als Abweichung von der Geradeausfahrt (Headingfehler), findet man keine Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Es scheint eher so, als ob die Fahrer eine Zeit lang nach dem Einsetzen der Schneefeldbewegung einen Punkt ansteuerten, der in einem fixen Winkel zur Geradeausrichtung der Straße lag. Die Lage dieses Punktes lässt sich aus diesem Experiment nicht genau ermitteln. Es wurde jedoch versucht, eine obere und untere Abschätzung dafür zu bekommen. Über die maximale laterale Geschwindigkeit wurde der maximale Headingfehler berechnet, und dieser kann deshalb als eine obere Grenze angesehen werden. Dieser Wert fällt dabei wahrscheinlich zu hoch aus, da die Lenkreaktionen der Fahrer selten optimal sind. Denn wenn ein Fahrer irrtümlich stärker als gewünscht gegen die Schneefeldbewegung gelenkt hat, würde sich dies auch in einem höheren maximalen Headingfehler wiederfinden. Der durchschnittliche Headingfehler sollte eine untere Abschätzung liefern. Der durchschnittliche Headingfehler unterschätzt sicherlich die untere Grenze, da hier ebenfalls Lenkfehler eingehen können, vor allem aber weil die Fahrer zu leicht unterschiedlichen Zeitpunkten mit der Abweichung begannen. Im Zeitintervall 3 bis 5 Sekunden nach Einsetzen der Schneefeldbewegung ist zwar die laterale Geschwindigkeit über alle Personen gemittelt annähernd konstant. Dies gilt jedoch sicherlich nicht für die individuellen Abweichungen in einzelnen Durchfahrten. Die ermittelten Headingfehler liegen dann zwischen 0.264° und 0.615° , und angenommen, sowohl die obere wie auch die untere Grenze über- und unterschätzen gleich stark, gelangt man zu einem Winkel von 0.44° . Es sei

hier angemerkt das dieser Wert kleiner ist als eine gute Heading-Diskriminationsleistung. Als Diskriminationsschwelle bei einer geradlinigen Bewegung kann ein Richtungsunterschied von 1° angenommen werden, wobei dieser Wert nicht zu hoch angesetzt ist (Atchley & Andersen, 1999; Royden et al., 1994; Warren et al., 1988). Das lässt vermuten, dass die Fahrer ihren Headingfehler auf der Basis des optischen Flusses nicht bemerken konnten. Das könnte wiederum bedeuten, dass die Fahrer nur solche lateralen Abweichungen zuließen, die unterhalb ihrer Diskriminationsschwelle für die Headingrichtung lagen.

Struktur des Flussfeldes und Exzentrizität des iFOE

Die Unabhängigkeit des Headingfehlers von der Vorwärtsgeschwindigkeit ist auch interessant für die Frage, welche Eigenschaften des irrelevanten Flussfeldes für die beobachtete Abweichung wichtig sein könnten. Was änderte sich im Flussfeld, wenn die Vorwärtsgeschwindigkeit erhöht wurde? Bei einer höheren Vorwärtsgeschwindigkeit war eine höhere seitliche Geschwindigkeit des Schneefeldes erforderlich, um die Exzentrizität des irrelevanten Expansionsfokus beizubehalten. Durch die höhere laterale Geschwindigkeit änderte sich die Expansionsstruktur des Schneefeldes nicht, lediglich die Winkelgeschwindigkeit einzelnen Elemente im Schneefeld nahm zu. Dass der Headingfehler bei hoher und bei niedriger Vorwärtsgeschwindigkeit vergleichbar war, kann dann als Hinweis genommen werden, dass die Winkelgeschwindigkeit einzelner Elemente nicht die Stärke der Abweichung bestimmte.

Andererseits wurde durch die Variation der Exzentrizität des Expansionsfokus des Schneefeldes (15° , 30° und 45°) weder der Betrag der Abweichung noch des Headingfehler beeinflusst. Dies kann zum einen daran gelegen haben, dass die Teststärke dieses Experiments zu gering war, um eine Abhängigkeit der Abweichung von der Exzentrizität des iFOE zu zeigen. Eine andere Interpretation bestünde darin, dass die Versuchspersonen tatsächlich relativ undifferenziert reagiert haben, und in erster Linie einzig auf die Richtung der Schneefeldbewegung antworteten.

Probandenmeinungen

Eine weitere Beobachtung soll in diesem Zusammenhang erwähnt werden. Die Mehrzahl der Teilnehmer in diesem Experiment äußerten auf Befragen, ob sie sich durch das seitlich bewegende Schneefeld hatten beeinflussen lassen, dass dies nicht der Fall war. Manche dieser Teilnehmer berichteten gleichzeitig aber auch, dass sie den Eindruck hatten, die Straße, vor allem der entfernte Bereich nahe am Horizont, würde eine Bewegung entgegen der Schneefeldbewegung vollziehen. Diese gegenläufige Bewegung zwi-

schen Straße und Schneefeld erinnert an das Phänomen der *induzierten Bewegung* (Dunker, 1929). Dort und in vielen Folgearbeiten wurde die Illusion untersucht, nach der ein stationärer Reiz sich zu bewegen scheint, wenn er von einem bewegten Hintergrund umgeben ist (Bridgeman, Kirch, & Sperling, 1981; Brosgole, 1968; Honda, 2001; Post & Heckmann, 1986). Der Hintergrund induziert seine Bewegung auf das stationäre Objekt, welches dann eine Bewegung in Gegenrichtung zu vollführen scheint (eine neuere Übersicht in Reinhardt-Rutland, 1988). Wer schon einmal Nachts gesehen hat, dass sich der Mond gegen die vom Wind bewegten Wolken verschiebt, hat genau diese induzierte Bewegung erlebt. Der Eindruck, dass vor allem entfernte Bereiche der Straße diese Scheinbewegung zeigen (auf der Bildebene somit nahe am Schneefeld), ist konsistent mit einer möglichen Beeinflussung durch induzierte Bewegung. Die Stärke einer induzierten Bewegung nimmt zu, je näher der induzierende Stimulus zum stationären Objekt ist (Gogel, 1974).

Die triviale Erklärung

Schließlich könnte der hier beobachtete Effekt des Zusteuerns zum iFOE, auch eine ganz andere, zugegebenermaßen triviale, Erklärung haben. Es könnte durchaus sein, dass die Fahrer deshalb gegen die Schneefeldbewegung lenkten, weil durch die Schneefeldbewegung der Eindruck entstand, es herrsche Seitenwind. Nun waren die Teilnehmer darüber informiert, dass es keine Perturbationen während der Fahrt geben werde, außer denen, die ausdrücklich bei der Einweisung erwähnt wurden. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein angenommener Seitenwind so etwas wie eine unwillkürliche Lenkreaktion ausgelöst haben könnte. Gegen diese Interpretation spricht, dass keine Abschwächung der Lenkreaktion über den Verlauf des Experimentes zu finden ist. Nachdem die Teilnehmer anfangs, vielleicht aufgrund ihrer Erfahrungen bei der realen Fahrzeugführung, unwillkürlich oder stereotyp auf den angenommenen Seitenwind reagiert hatten, dürfte man erwarten, dass sie allmählich beobachten konnten, dass ihre Lenkkorrekturen ungerechtfertigt waren, und nur zu einer ungewollten Abweichung von der Straßenmitte führten. Mehr Belege dafür zu suchen, dass der beobachtete Effekt der lateralen Korrektur unmittelbar eine Folge der visuellen Bewegung im oberen Gesichtsfeld ist, statt eine eher indirekte, durch falsche Annahmen vermittelte Reaktion, ist die Motivation für das Experiment im folgenden Abschnitt.

Vogelschwarm

Es wurde nach einem Szenario gesucht, in dem zwar visuelle Bewegung möglichst natürlich und glaubhaft während der Fahrt dargeboten werden konnte, jedoch der visuellen Bewegung nicht der Eindruck anhaftete, als sei sie von externen Kräften angetrieben, wie dies bei der Schneefeldbewegung der Fall war. Die Wahl fiel auf eine Bewegung, die durch einen weit ausgedehnten Vogelschwarm verursacht wurde. Damit war die Hoffnung verbunden, dass die Betrachter den Eindruck bekommen, die einzelnen Vögel würden zwar in eine gemeinsame Richtung fliegen, jedoch so, dass dabei sich jeder Vogel aufgrund seiner eigenen Aktivität vorwärts bewegt, und nicht etwa, weil der gesamte Schwarm vom Wind getrieben wird. Um einen solchen animierten Eindruck zu erwecken, hätte man idealerweise die Flug- und Flügelbewegung eines Vogels nachahmen können. Vor allem die animierte Flügelbewegung erschien hier als zu aufwendig und rechenintensiv. Stattdessen sollte mit folgenden Eigenschaften ein belebter Eindruck gewonnen werden:

- Vögel bewegten sich auf- und abwärts. Dadurch sollte vertikale Bewegung beim Flügelschlag suggeriert werden.
- Die vertikale Bewegung war zwischen den Vögeln nicht synchron, sondern phasenverschoben. Dies suggerierte, dass jeder Vogel in einem eigenen Rhythmus fliegt.
- Die Flugrichtung korrespondierte zur Körperlängsachse, so als würden sich die Vögel aktiv in eine neue Richtung drehen.
- Die Vögel hatten unterschiedliche Größen. Damit sollte der ansonsten vorherrschende Zusammenhang zwischen Größe und Winkelgeschwindigkeit abgeschwächt werden.

Damit sollte es schwieriger werden zu erkennen, dass sich alle Vögel mit der gleichen absoluten Geschwindigkeit bewegten, und es sollte der Eindruck erzielt werden, dass die Vögel jeweils eigene Fluggeschwindigkeiten besaßen.

Die Erwartung war, dass sich somit im Fahrverhalten keine systematischen lateralen Korrekturen auffinden lassen sollten, wenn tatsächlich Lenkreaktionen auf vermeintlichen Seitenwind die Ursache für das im vorigen Experiment beobachtete Verhalten war. Im Gegensatz dazu sollten die Fahrer auch hier systematisch entgegen der Vogelschwarmbewegung lenken, möglichst unmittelbar nachdem diese eingesetzt hat, wenn einzig die visuelle Bewegung im Gesichtsfeld für das Zusteuern zum irrelevanten Expansionsfokus verantwortlich war.

Methoden

In methodischer Hinsicht entspricht dieses Experiment weitgehend dem Schneesturm-Experiment. Die Änderungen lagen vor allem in der Präsentation der Szenerie.

Damit die dunklen Vogelfiguren deutlich gegen den Hintergrund zu erkennen waren, wurde der Himmel als blaue-weiße Wolkenstruktur präsentiert (Abbildung 4.5.). In einem vor dem Fahrer mitbewegten Volumen von 1000 x 1200 x 100 m (Breite, Tiefe, Höhe) wurden 500 Vögel zufällig platziert. Das waren deutlich weniger als die 5000 Elemente des Schneevolumens, denn nur bei dieser reduzierten Anzahl konnte eine zufriedenstellende Aktualisierungsrate von 36 Hz erreicht werden. Das Volumen wurde in der Breite ausgedehnt, da in diesem Experiment die Szene auf der Projektionsfläche einen horizontalen Bereich von 180° einnahm. Bei der ursprünglichen Volumenbreite von 500 m wäre die Vogeldichte in den seitlichen Bereichen sehr ausgedünnt gewesen.

Die Grundversion der Vögel bestand aus einem einfachen Modell (Abbildung 4.5.). Das Modell war 2.7 m lang, 3.5 m breit, und 0.8 m hoch. Aus dieser Grundversion wurden uniform skalierte Versionen abgeleitet, deren Größe zufällig zwischen 50% und 150% der Grundversion variierte. Die Vogelmodelle waren somit verhältnismäßig groß, da sie auch bei größerem Abstand zum Beobachter noch gut erkennbar sein sollten.

Der Vogelschwarm hatte eine Eigengeschwindigkeit relativ zum Grund, die das 1.5-fache der Geschwindigkeit des Fahrers betrug. Die Vögel vollzogen gleichzeitig eine sinusoidale Bewegung in vertikaler Richtung, mit einer Frequenz von 1.32 Hz und Amplituden von 0.44 m bei einer Geschwindigkeit des Fahrers von 60 km/h, und 0.66 Hz und Amplitude von 0.22 m bei 30 km/h. Die Phase der sinusoidalen Vogelbewegung war für jeden Vogel zufällig, so dass die Vögel sich entlang der vertikalen Richtung teilweise gegenläufig bewegten, und in Verbindung mit der Eigengeschwindigkeit der Eindruck entstand, die Vögel bewegten sich aus eigenem Antrieb vorwärts. Wenn die Vögel sich quer zum Fahrer bewegten, änderten sie entsprechend auch ihre Orientierung. Die seitliche Bewegung setzte während einer der kurzen Dunkelperioden (250 ms) abrupt ein.

Jede Versuchsperson absolvierte 54 Durchfahrten, aufgeteilt auf drei Versuchsblöcke. Jeder Durchgang war 25 Sekunden lang. Die 36 Durchgänge mit seitlichem Vogelflug, waren eine Kombination aus 3 Versuchsblöcken, 2 Geschwindigkeiten des Fahrers (30 und 60 km/h), 3 Exzentrizitäten des Expansionsfokus des Vogelschwarms (iFOE-Exzentrizität von 15°, 30° und 45°), und 2 Richtungen des iFOE (links oder rechts der Fahrtrichtung). Jede Faktorstufenkombination wurde nur einmal getestet. In den restlichen 18

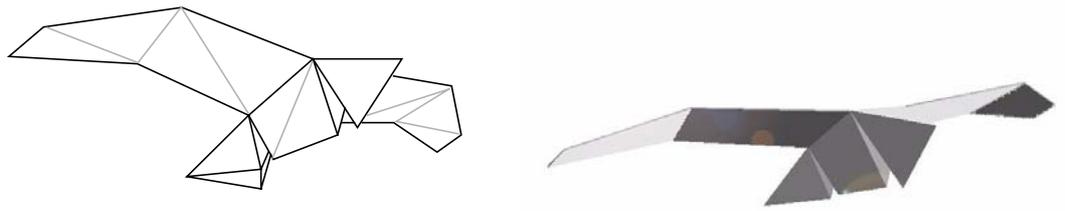


Abbildung 4.5. Ansicht des dreidimensionalen Vogelmodells und des Fahr Szenarios. Oben: Das vereinfachte Modell eines Vogels bestand aus 66 Dreiecken und 98 Vertices. Unten: Fahr Szenario mit entgegenfliegenden und querfliegenden Vogelvolumen. Die Flugrichtung des Vogelschwarms ist auch gut durch die Orientierung der einzelnen Vögel zu erkennen.

Durchfahrten wurden die Fahrer auf der Fahrbahn versetzt, wie im vorigen Experiment beschrieben. Die Abfolge der Bedingungen wurde innerhalb eines Versuchsblocks randomisiert. Zwischen den Versuchblöcken wurden einige Minuten Pause eingelegt.

Vier Versuchspersonen im Alter zwischen 26 und 31 Jahren (Mittelwert 28.8) nahmen an diesem Experiment teil. Keiner hatte am vorigen Experiment teilgenommen. Alle waren lizenzierte Fahrer und nur eine Person gab an nicht mehrmals wöchentlich ein Fahrzeug zu benutzen. Die Vergütung der Probanden betrug 15 DM/h.

Ergebnisse

Die Differenzen in der lateralen Position zwischen dem Einsetzen der seitlichen Vogelschwarmbewegung und 5 Sekunden später wurde einer Varianzanalyse unterzogen. Diese ergab einen signifikanten Effekt des Faktors Richtung des irrelevanten Expansionsfokus, $F(1,4) = 18.30$, $p = 0.023$, und einen Effekt des Versuchsblocks, $F(2,6) = 6.53$, $p = 0.031$.

Wie der Abbildung 4.6. zu entnehmen ist, steuerten die Fahrer systematisch in Richtung des iFOE, also in Gegenrichtung zur Vogelschwarmbewegung. Die Abweichung, die sie nach 5 Sekunden erreichten, war bei der höheren Geschwindigkeit größer, diesmal jedoch nur nominal. Die Interaktion zwischen der Richtung des iFOE und der Geschwindigkeit war nicht signifikant, $F(1,3) = 5.670$, $p > 0.05$. Bei 60 km/h beobachtete man im Mittel eine Positionsänderung von 0.145 m, und bei 30 km/h nur noch 0.036 m. In Abbildung 4.7. ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit auch über die Versuchsblöcke dargestellt. Wie man sieht, trennen sich die Mittelwerte der einzelnen Faktorenstufenkombinationen, trotz der fehlenden statistischen Signifikanz, recht konsistent. Der signifikante Effekt Versuchsblock ist graphisch in Abbildung 4.8. dargestellt. Der Faktor Versuchsblock war für sich allein signifikant, ohne eine Wechselwirkung mit der Richtung des iFOE. Insofern ist dieser Effekt nicht unmittelbar mit den unterschiedlichen Richtungen der Vogelschwarmbewegung in Verbindung zu bringen.

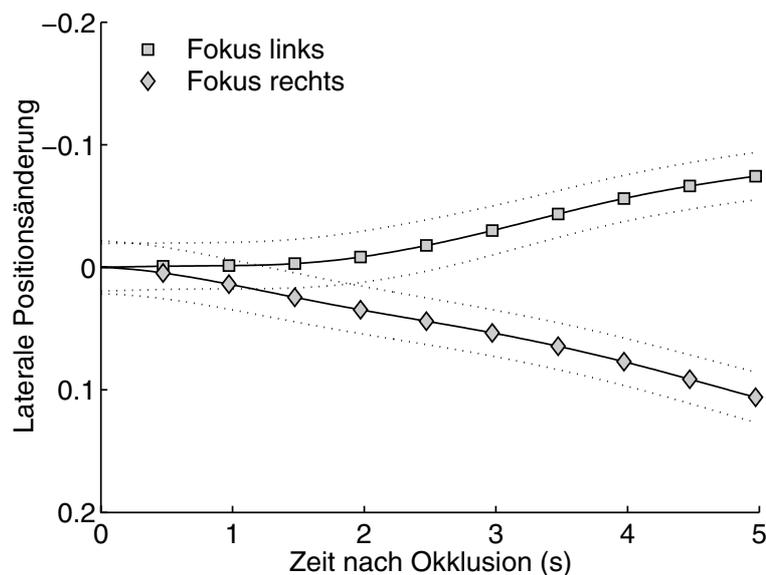


Abbildung 4.6. Laterale Positionsänderung nach Einsetzen der Vogelschwarmbewegung: Hauptergebnis der Richtung des iFOE. Wenn der iFOE des Vogelschwarms links von der Fahrtrichtung liegt, geht die Vogelschwarmbewegung nach rechts: Die Fahrer steuern in diesem Fall nach links (■), und umgekehrt. Gestrichelten Linien stellen ± 1 Standardschätzfehler der lateralen Position dar. $N = 4$.

In der Abbildung erkennt man, dass die Signifikanz dieses Faktors sehr wahrscheinlich auf eine im Mittel stärkere Abweichung nach rechts im ersten Versuchsblock zurück zu führen ist. Zwar zeigte sich ein Effekt des Faktor Versuchsblock in der Varianzanalyse als signifikant, post-hoc Vergleiche aller dreier Mittelwerte mit einer Bonferroni-Korrektur ergaben dagegen keinen signifikanten Mittelwertsunterschied (alle $p > 0.05$). Bei der geringen Zahl

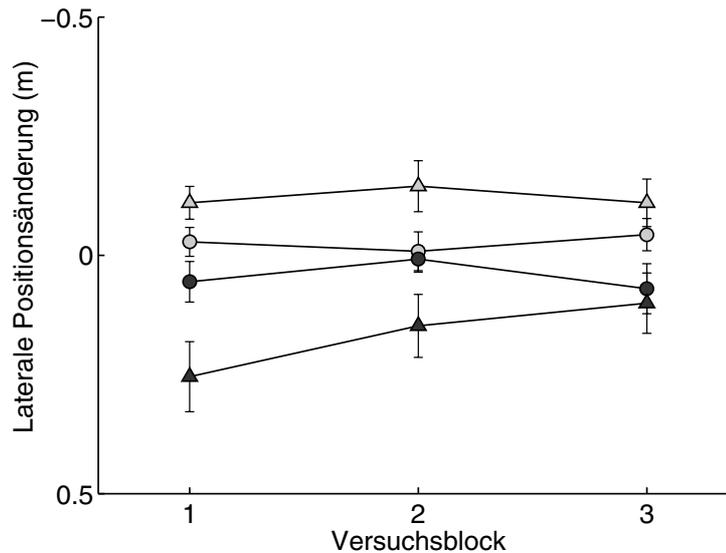


Abbildung 4.7. Laterale Positionsänderung getrennt aufgetragen nach Geschwindigkeit, Richtung und Versuchsblock. Die Interaktion zwischen Richtung des Expansionsfokus und Geschwindigkeit ist nicht signifikant ($p = 0.098$), bestätigt jedoch tendenziell die Ergebnisse des vorigen Experimentes (siehe auch Abbildung 4.3.). Helle (dunkle) Markierung stellen die Mittelwerte der Bedingungen, in denen der iFOE links (rechts) von der Fahrtrichtung lag. Geschwindigkeiten: ● = 30 km/h, ▲ = 60 km/h.

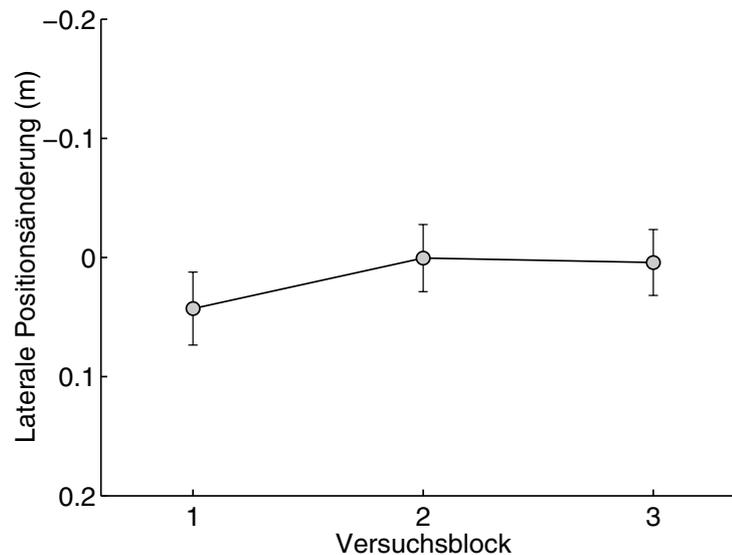


Abbildung 4.8. Effekt des Versuchsblocks. Der signifikante Unterschied der Positionsänderung zwischen den Versuchsblöcken scheint insbesondere auf die insgesamt stärkere Reaktion nach rechts im ersten Versuchsblock zurück zu gehen.

an Versuchspersonen und den relativ wenigen Wiederholungen, die in diese Mittelwerte eingingen, sollte diesem Effekt keine besondere Bedeutung beigemessen werden.

Zusammenfassung und Diskussion

Dieses Kontrollexperiment konnte zusätzliche Evidenz dafür liefern, dass die systematische Abweichung von der Straßenmitte in die Richtung des irrelevanten Expansionsfokus aufgrund der visuellen Bewegung geschieht, und nicht aufgrund einer Kompensationsreaktion auf vermuteten Seitenwind.

Die hier beobachteten Abweichungen waren etwas kleiner als im vorigen Versuch. Jedoch wurde ein bewegtes Feld simuliert, das weit weniger Elemente enthielt und dabei ein etwas größeres Volumen hatte. Insgesamt war demnach die Dichte der Elemente deutlich reduziert. Es ist nicht überraschend, wenn dadurch die Fahrer einen geringeren Bewegungseindruck hatten. Tendenziell wurde auch die Abhängigkeit der lateralen Abweichung von der Vorwärtsgeschwindigkeit bestätigt. Ferner gleichen sich die Resultate beider Experimente, indem sie keinen systematischen Einfluss der Exzentrizität des irrelevanten Expansionsfokus zeigen, und auch keine Reduktion der Abweichung über den Versuchszeitraum. Der letztgenannte Befund zeigt, dass die Fahrer auf diese Beeinflussung nicht adaptiert oder dagegen kompensiert haben. Die mangelnde Kompensation könnte auch darin liegen, dass viele Fahrer sich von der seitlichen Flussbewegung gar nicht beeinflusst sahen.

Aufgrund der Resultate des Schneesturm- und Vogelscharm-Experiments soll der beobachtete Effekt als etabliert und genügend exploriert betrachtet werden. Die Gründe für die beobachteten Abweichungen von der Geradeausfahrt aufgrund der visuellen Bewegung genauer zu untersuchen, ist die Aufgabe der folgenden zwei Abschnitte (Kapitel 5 „Heading oder subjektives Geradeaus“ und Kapitel 6 „Blick und Bewegungsrichtung“).

HEADING ODER SUBJEKTIVES GERADEAUS

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Mechanismen zu der beobachteten Lenkreaktion bei einer lateralen, großflächigen Bewegung im visuellen Feld führen. Die Teilnehmer waren in diesen Experimenten passive Beobachter einer Fahrszene und mussten in regelmäßigen Abständen eine Richtungsschätzung abgeben. Zwei alternative Erklärungen werden in zwei Experimenten gegeneinander geprüft. Die erste Hypothese setzt bei einer optischer Illusion an, nach der unter einer bestimmten Stimuluskonfiguration die wahrgenommene Lage des Expansionsfokus verändert wird (Exp. 1). Der zweite Ansatz untersucht, ob eine seitliche visuelle Bewegung die subjektive Medianebene der Probanden beeinflussen kann (Exp. 2). Die Hypothesen, die geprüft werden, lauten:

- Durch die gerichtete Bewegung eines zweiten irrelevanten Flussfeldes werden die wahrgenommene Lage des Expansionsfokus eines primären Flussfeldes und die Headingrichtung zur Richtung des irrelevanten Flussfeldes verändert.
- Durch die gerichtete Bewegung eines zweiten irrelevanten Flussfeldes wird die Lage des subjektiven Geradeaus des Beobachters zur Richtung des irrelevanten Flussfeldes beeinflusst.

Die beiden Hypothesen können als *objekt-relative* und *subjekt-relative* Erklärung bezeichnet werden, zwei Bezeichnungen, die schon bei der Interpretation der induzierten Bewegung verwendet worden sind (Brosgole, 1968).

Die Resultate dieser Versuche liegen eher in Übereinstimmung mit der objekt-relativen Erklärung. Danach induziert die seitwärts gerichtete Flussbewegung eine Bewegung auf die Struktur des Grundes. Die induzierte Bewegung kann formal als Vektorsubtraktion zwischen zwei Flussfeldern aufgefasst werden, infolgedessen eine Verschiebung der wahrgenommenen

Bewegungsrichtung stattfindet, auf die mit einer kompensatorischen Lenkreaktion geantwortet wird.

Expansionsfokus und Heading unter Schneefeldbewegung

Eine interessante Illusion, die bei zwei überlagerten Flussfeldern auftritt, wurde erstmalig von Duffy und Wurtz (1993) erwähnt und untersucht. Die Autoren zeigten Versuchspersonen radial expandierende Punktemuster, wie sie bei einer Annäherung an eine ebene Wand auftreten, in denen die Lage des Expansionsfokus (FOE) angezeigt werden musste. Wenn das radiale Muster durch ein weiteres, planares Punktemuster (parallele Flussvektoren gleicher Geschwindigkeit) überlagert wurde, konnte eine Verschiebung des wahrgenommenen FOE in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des planaren Musters festgestellt werden. Wenn das planare Muster eine Bewegung nach rechts vollzog, wurde auch die Lage des FOE des radial expandierenden Musters in diese Richtung verschoben (Abbildung 5.1.).

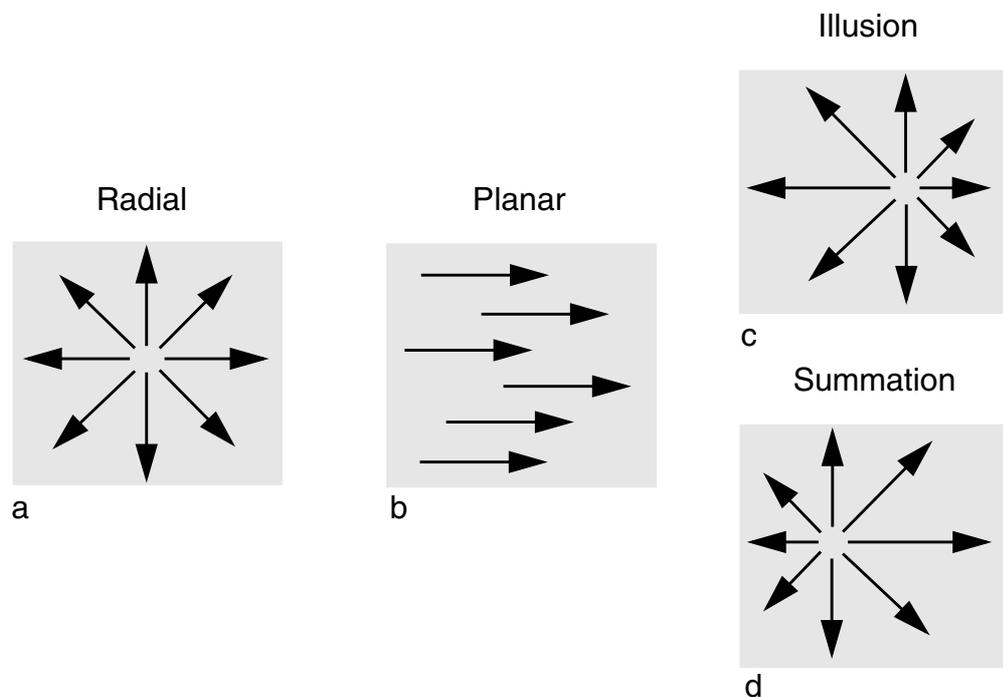


Abbildung 5.1. Das Phänomen der illusorischen Verschiebung des Expansionsfokus. Ein radiales Flussmuster (a) wird von einem planaren optischen Flussmuster (b; parallele Vektoren gleicher Länge) überlagert. Bei der Illusion (c) wird der Expansionsfokus (FOE) des radialen Musters in die Bewegungsrichtung des planaren Musters verschoben. Bei einer Summation der Flussmuster resultiert eine (tatsächliche) Verschiebung des FOE gegen die Bewegungsrichtung des planaren Musters (d).

Wenn dagegen das zweite Punktemuster stationär war, wurde keine illusorische Verschiebung des FOE festgestellt. Unter Bedingungen schließlich, in der keine Überlagerung existierte, da das optische Flussmuster als eine

Summation aus den Vektoren eines planaren und eines radialen Muster präsentiert wurde und der FOE tatsächlich verschoben war, wurde die Lage des FOE korrekt angezeigt, also entgegen der Bewegungsrichtung der planaren Vektoren.

Die Interpretation, die von den Autoren vorgeschlagen wurde, sah diese Illusion als eine unangebrachte Kompensation des visuellen Systems auf eine vermeintliche Augenbewegung. Die planare Bewegung wird vom visuellen System irrtümlicherweise als Resultat einer Augenbewegung gedeutet. Eine planare Bewegung nach rechts wird so interpretiert, als haben sich die Augen nach links gedreht. Nach Duffy und Wurtz soll diese Interpretation auch dadurch erleichtert worden sein, dass die planare Bewegung in ihrem Experiment über einen weiten Bereich des visuellen Feldes zu sehen war. Die anschließende Kompensation auf diese vermeintliche Augenbewegung führt dann zu der beobachteten Verschiebung des FOE (Duffy & Wurtz, 1993; Duffy & Wurtz, 1995). Diese Interpretation würde dann weiterhin bedeuten, dass das Gehirn Informationen über die Stellung der Augen oder eine Efferenzkopie des Augenbewegungssignals nicht nutzt, um zu entscheiden, ob die wahrgenommene planare Bewegung aufgrund einer Bewegung der Umgebung oder der Augen entstanden ist. Die Vorstellung von Duffy und Wurtz, dass die planare Bewegung als Augenbewegung missinterpretiert wird, erhielt zusätzliche Unterstützung zum einen durch Simulationen eines biologisch plausiblen Modells, welches ebenfalls eine illusorische Verschiebung des FOE liefert (Lappe & Rauschecker, 1995), und zum anderen in Befunden, dass die illusorische Verschiebung stärker ist, wenn die planare Bewegung stereoskopisch „hinter“ dem radial expandierenden Stimulus präsentiert wird (Grigo & Lappe, 1998). Der letzte Befund wird damit erklärt, dass das Flussfeld bei dieser Illusion konsistent ist mit einem Flussfeld, das bei einer Vorwärtsbewegung und gleichzeitiger Augenbewegung entsteht. In einer solchen Situation entsteht retinale Bewegung von weit entfernten Objekten hauptsächlich aufgrund von Augenbewegungen und das dazugehörige Flussfeld ist planar. Wenn das visuelle System das radiale Flussfeld rekonstruieren muss, um beispielsweise den Expansionsfokus und die Bewegungsrichtung zu ermitteln, kann es von dieser Eigenschaft Gebrauch machen. Der Beitrag der Augenbewegungen im retinalen Fluss kann eliminiert werden, indem die planare Bewegung abgezogen wird. Wenn die planare Bewegung zusätzlich noch aus entfernten Bereichen stammt, wird diese Bewegung eher als Augenbewegungen interpretiert, was zur Folge hat, dass die Illusion stärker wird.

Nachfolgende Arbeiten bestätigten den grundsätzlichen Effekt der Verschiebung des FOE, zogen allerdings die Interpretation in Zweifel. Es wurde gezeigt, dass der Betrag der Verschiebung des FOE und der Betrag der *indu-*

zierten Bewegung, die durch die planare Bewegung ausgelöst wird, in der gleichen Größenordnung liegen (Meese, Smith, & Harris, 1995). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Vorstellung entwickelt, dass diese Illusion ein Ergebnis einer induzierten Bewegung des planaren Musters auf das radiale Muster ist. Bereits früher schon wurde nachgewiesen, dass induzierte und reale Bewegung sich grundsätzlich zu einer neuen Bewegungsrichtung addieren lassen (Post & Chaderjian, 1988). Die neuere Interpretation geht nun davon aus, dass die planare Bewegung eine Bewegung in Gegenrichtung induziert, welche zum expandierenden Muster dazu addiert wird (Meese et al., 1995). Statt eine Gegenbewegung zu addieren, kann man dies auch direkt ausdrücken: Das resultierende illusorische Flussfeld ist eine *Vektorsubtraktion* des planaren vom radialen Muster. Diese neue Interpretation wird auch mit Resultaten gestützt, nach denen auch eine illusorische Verschiebung zu sehen ist, wenn ein in der frontoparallelen Ebene *rotierendes* Flussfeld mit einem planaren Flussfeld überlagert wird. Die beobachtete Verschiebung ist dann senkrecht zur Bewegung des planaren Flussfeldes (Pack & Mingolla, 1998), und ist inkonsistent mit der Idee, dass die planare Bewegung als Augenbewegungssignal interpretiert wird. Danach hätte man erwarten können, dass auch bei einem rotierenden Muster der FOE in Richtung des planaren Musters verschoben wird. Alledings zeigt die Studie von Pack und Mingolla (1998) auch, dass der Betrag der Versetzung des FOE auch mit der Größe des Feldes der planaren Bewegung zunimmt. Dieses Ergebnis wäre dann wiederum konsistent mit der ursprünglichen Erklärung, und zeigt zumindest, dass die illusorische Versetzung nicht nur auf einer induzierten Bewegung basiert, die aus einer lokalen Zentrum-Umfeld Interaktion entsteht, sondern dass ein globaler Mechanismus der Illusion zugrunde liegt.

Ungeachtet der möglichen Gültigkeit einer dieser Interpretationen, kann allein die Tatsache, dass der FOE eines expandierenden Flussfeldes verschoben wird, eine potentielle Erklärung der Befunde in den Schneesturm- und Vogelschwarm-Experimenten sein. Wenn, wie in Abbildung 5.1. dargestellt, eine seitliche Schneefeldbewegung nach rechts dazu führt, dass der Expansionsfokus ebenfalls nach rechts verschoben erscheint, dann könnte dadurch auch die empfundene Fahrtrichtung beeinflusst worden sein. Setzen Fahrer dann die Lage des wahrgenommenen FOE des Grundes mit der Bewegungsrichtung gleich, könnten sie den Eindruck bekommen, dass sie rechts von der Straße abkommen werden, wenn sie diese Fahrtrichtung beibehalten würden. Eine Korrektur nach links wäre dann zu erwarten, und dies wäre in bester Übereinstimmung mit den systematischen Reaktionen der Fahrer in den Schneesturm- und Vogelschwarm-Experimenten (Kap. 4).

Alle hier zitierten Arbeiten haben als abhängige Variable die Position des FOE. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand existiert keine empirische Untersuchung, die zeigt, dass bei einer solchen Stimuluskonfiguration die momentane Bewegungsrichtung (Heading) ebenfalls einer Illusion in die gleiche Richtung unterliegt. Das empirische Ziel dieses Versuch war daher festzustellen, ob die Headingurteile bei lateraler Schneefeldbewegung diesen systematischen Fehler zeigen, und wenn ja, sollte weiter eine Abschätzung erfolgen, wie gut der Betrag des Fehlers zu der ermittelten lateralen Abweichung im Fahrexperiment korrespondiert.

Die Verschiebung des FOE wurde in den erwähnten Arbeiten schon nach einer kurzen Präsentation von 3 Sekunden beobachtet. Diese Präsentationszeiten stimmen gut damit überein, dass auch die Fahrer, wie im Kapitel 4 beschrieben, im gleichen Zeitraum eine Lenkreaktion zeigten. Der Verlauf eines systematischen Fehler bei zeitlich andauernden Präsentation ist dagegen ungewiss. Um eine Zu- oder Abnahme zu untersuchen, wurden von den Beobachtern wiederholt Headingurteile abverlangt. Aus früheren Arbeiten zur induzierten Bewegung stammen Hinweise, dass über einen Zeitraum von bis zu 2 Minuten die empfundene Stärke zunehmen kann bevor sie einen maximalen Wert erreicht (Post & Heckmann, 1986).

Statt einer planaren Bewegung, die dem Expansionsfeld überlagert wurde, wurde das seitlich bewegt Schneevolumen beibehalten. Dies sollte in erster Linie die Vergleichbarkeit des visuellen Stimulus in beiden Versuchen sicher stellen. Notwendigerweise unterscheidet sich das Schneevolumen vom planaren Muster in einigen wesentlichen Eigenschaften. So besitzt das Schneevolumen einen eigenen, für die Aufgabe irrelevanten, Expansionsfokus (iFOE), die Vektoren sind nicht parallel, sondern radial, und die Bewegung wird mit Punkten in unterschiedlicher Tiefe erzeugt, statt mit Punkten, die in gleicher Tiefe auf der frontoparallelen Ebene liegen. Im günstigsten Fall bestünde die Chance damit, neben der Vergleichbarkeit zum Schneesturm-Experiment, eine Verschiebung des Heading auch auf solche abgeänderte Stimuluskonfigurationen auszuweiten. Bei negativen Ergebnissen allerdings wüsste man nicht, ob ein überlagertes zweites Flussfeld keinen Effekt auf die Headingwahrnehmung hat, oder es nicht geeignet war, eine Verschiebung des wahrgenommenen FOE auszulösen. Eine Ursache für ein negatives Ergebnis könnte darin liegen, dass das Schneefeld eben keine planare Struktur hat, und deshalb von einem Flussfeld, das bei Augenbewegungen generiert wird, stark abweicht.

Methoden

Die virtuelle Szenerie entsprach der Szenerie des Schneesturm-Experiments (Kap. 4). Dabei beobachteten die Teilnehmer eine geradlinige Fahrt in

der Mitte der Straße. Sie wurden angewiesen, zu definierten Zeitpunkten während der Fahrt, eine visuelle Markierung, welche sie mit einem Joystick steuerten, in die Richtung, in die sie sich momentan bewegten, zu platzieren.

Versuchsbedingungen

Folgende Faktoren wurden in diesem Experiment manipuliert: Fahrgeschwindigkeit, Richtung des irrelevanten Expansionsfokus (iFOE-Richtung), Sichtbedingungen während der Antwortabgabe und Fahrtrichtung in Leinwandkoordinaten. Ein weiterer Faktor war der Zeitpunkt der Antwort innerhalb eines Durchgangs.

Die Fahrgeschwindigkeit betrug 10 oder 20 m/s (36 oder 72 km/h). Mit der höheren Fahrgeschwindigkeit verdoppelte sich auch die laterale Geschwindigkeit des Schneefeldes. Das Schneefeld bewegt sich entweder nach links oder nach rechts mit einer solchen lateralen Geschwindigkeit, dass ein iFOE des Schneefelds entstand, der jeweils 30° rechts oder links von der Bewegungsrichtung lag.

Zwei unterschiedliche Sichtbedingungen herrschten zu dem Zeitpunkt als die Teilnehmer ihre Richtungsschätzung abgeben mussten. In der einen Bedingung wurde das Bild vollständig verdunkelt, die Szenerie war für eine Zeitdauer nicht mehr zu sehen. In der anderen Bedingung war die Landschaft, die Vorwärtsbewegung und die seitliche Bewegung des Schneefeldes weiterhin sichtbar. Nur die Straße wurde aus der Szenen entfernt und die Teilnehmer fuhren über eine grüne Wiese. Damit sollte verhindert werden, dass die Teilnehmer sich an der Lage der Straße orientierten. Gleichzeitig sollte jedoch die Antwort unter Bedingungen abgegeben werden, die mit einer realen Fahrt vergleichbar waren, d.h. vor allem unter andauernder Einwirkung der Schneefeldbewegung.

Schließlich sollte die Fahrtrichtung in Bezug auf den sitzenden Beobachter manipuliert werden, so dass die Richtung der Straße nicht immer genau in seiner Geradeaus-Richtung lag. Da dieser Versuch die Beeinflussung der Richtungsschätzung untersuchte, sollten externe Hinweisreize, z.B. die Lage der Straße in egozentrischen Koordinaten oder die Orientierung an der subjektiven Geradeaus-Richtung minimiert werden. Dazu wurde die Vorwärtsbewegung in drei Richtungen präsentiert: Die Fahrtrichtung wies entweder auf die Leinwandmitte (und damit genau vor dem Beobachter), oder 5° links oder rechts von der Leinwandmitte.

Insgesamt wurden 28 Durchgänge von jeweils ca. 60-70 Sekunden absolviert. In 24 Durchgängen wurde eine seitliche Schneefeldbewegung gezeigt, und diese setzten sich zusammen aus einer faktoriellen Kombination von 2 Geschwindigkeiten (10 und 20 m/s), 2 iFOE-Richtungen (links und rechts

der Straße), 2 Sichtbedingungen (Dunkelheit oder Wegnahme der Straße) und 3 Fahrtrichtungen (-5° , 0° und 5°). In weiteren 4 Durchgängen besaß das Schneefeld keine laterale Geschwindigkeit und hier wurde die Szene bei der Antwortabgabe nicht verdunkelt.

Ablauf eines Durchgangs

In jedem Durchgang wurde 6 sukzessive Richtungsschätzungen verlangt. Der zeitliche Ablauf ist in Abbildung 5.2. dargestellt. Im ersten Durchgang wurde die Fahrt für 10 Sekunden präsentiert. Unmittelbar danach wurde die Szene verdunkelt (bzw. die Straße entfernt) und ein kleiner (6 Pixel Durchmesser) hellroter Zielpunkt wurde auf die Leinwand in Augenhöhe projiziert, zufällig an einer von 4 Stellen (10 oder 20 Grad links oder rechts von der Leinwandmitte). Die Teilnehmer bewegten mittels eines Joysticks den Zielpunkt in die geschätzte Bewegungsrichtung. Der Zielpunkt konnte nur in horizontaler Richtung bewegt werden. Die Richtungsschätzung wurde durch Betätigen einer abzugsähnlichen Taste am Joystick abgegeben. Unmittelbar danach verschwand der Zielpunkt, und nach 1.5 s wurden die ursprünglichen Sichtbedingungen wieder hergestellt. Das Intervall der anschließenden Schätzung begann dann wieder mit der Präsentation der Fahrt bis zu den nächsten vollen 10 Sekunden. Wenn allerdings die Dauer bis zur Antwortabgabe im vorigen Intervall länger als 3.5 Sekunden war, wurde stattdessen die Fahrt für 5 Sekunden gezeigt.

Dieses Verfahren sollte eine Mindestpräsentationszeit von 5 Sekunden für alle Teilnehmer gewährleisten. Das Intervall von 1.5 s nach der Antwortabgabe bis zur Wiederherstellung der ursprünglichen Sichtbedingungen sollte verhindern, dass die Versuchspersonen ihre Antwort anhand der Position der wiedererscheinenden Straße überprüfen konnten. Die ersten drei Schätzungen jedes Durchgangs wurden unter seitlicher Schneefeldbewegung abgegeben, die letzten drei Schätzungen dagegen ohne Schneefeldbewegung. Die zweite Hälfte des Durchgangs ohne seitliche Bewegung sollte verhindern, dass ein möglicher Bewegungsnacheffekt in den nächsten Durchgang übertragen worden wäre.

Durchführung

Sechs Versuchspersonen im Alter zwischen 23 und 26 Jahren nahmen an diesem Experiment teil. Niemand hatte an einem der vorigen zwei Experimenten teilgenommen. Die 28 Durchgänge wurden in zufälliger Abfolge absolviert, und die Gesamtdauer betrug ca. 35 Minuten. Die Szene wurde über die gesamte Leinwand (180°) mit einer Aktualisierungsrate von 36 Hz projiziert. Das Gesichtsfeld der Versuchspersonen wurde jedoch während des ganzen Versuchs durch das Tragen einer präparierten Skibrille einge-

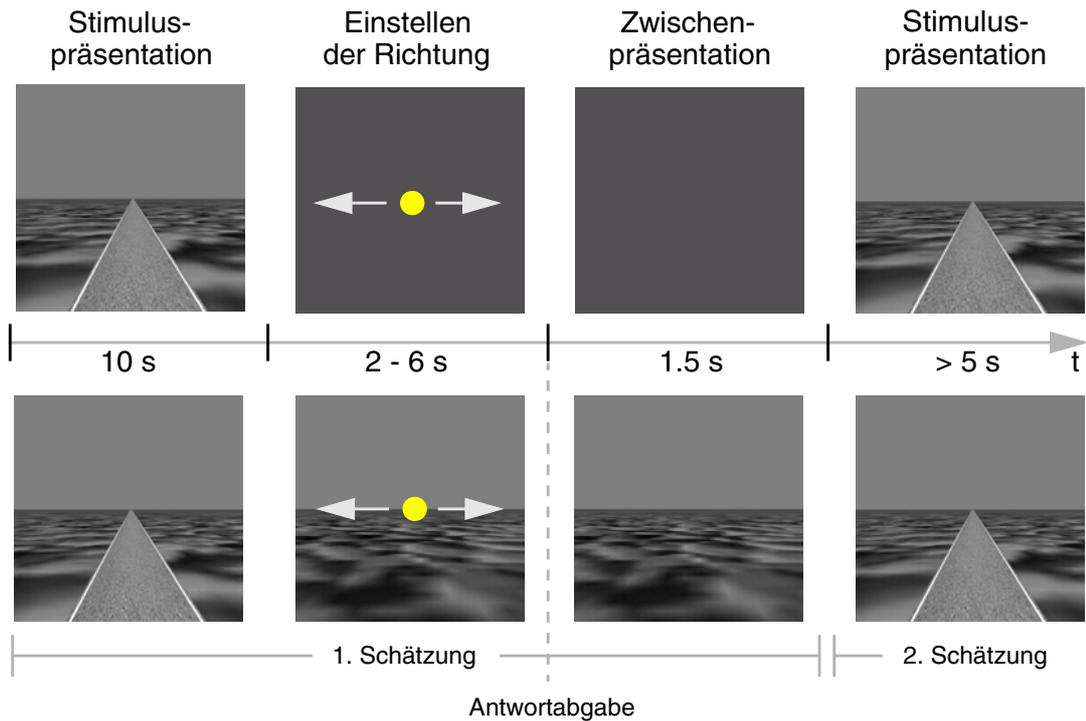


Abbildung 5.2. Zeitlicher Ablauf eines Durchgangs mit Wegnahme der gesamten Szene (oben) oder nur der Straße (unten). Wenn die Landschaft zu sehen war, wurde auch Schneefall simuliert (hier nicht dargestellt).

schränkt, und betrug ca. 35° vertikal und ca. 100° horizontal. Die vertikale Einschränkung sollte die Orientierung an den Leinwandgrenzen vermindern, und erlaubte nicht die obere und untere Begrenzung gleichzeitig zu sehen.

Ergebnisse

Jeweils die drei ersten Headingschätzungen in jedem Versuchsdurchgang wurden einer sechsfaktoriellen Varianzanalyse unterworfen. Es zeigten sich zwei Effekte signifikant. Die Interaktion zwischen der iFOE-Richtung und der Sichtbedingung war signifikant, $F(1,5) = 25.02$, $p = 0.004$. Diese Interaktion ist in Abbildung 5.3. dargestellt. Wenn während der Antwortabgabe die Landschaft weiterhin sichtbar war, bestand ein negativer Zusammenhang zwischen der Exzentrizität des iFOE und der Headingschätzung: Die Headingurteile wiesen systematisch *in Richtung* der Schneefeldbewegung. Wenn bei der Antwortabgabe verdunkelt wurde, kehrte sich dieser Zusammenhang um, und die Headingurteile wurden systematisch entgegen der Schneefeldbewegung verschoben. Ferner sieht man unter dieser Bedingung, dass die Urteile insgesamt eine Tendenz nach rechts hatten. Der zweite Effekt ist der Faktor Fahrtrichtung, $F(2,10) = 4.34$, $p = 0.044$. Es zeigte sich auch hier ein negativer Zusammenhang zwischen Fahrtrichtung und

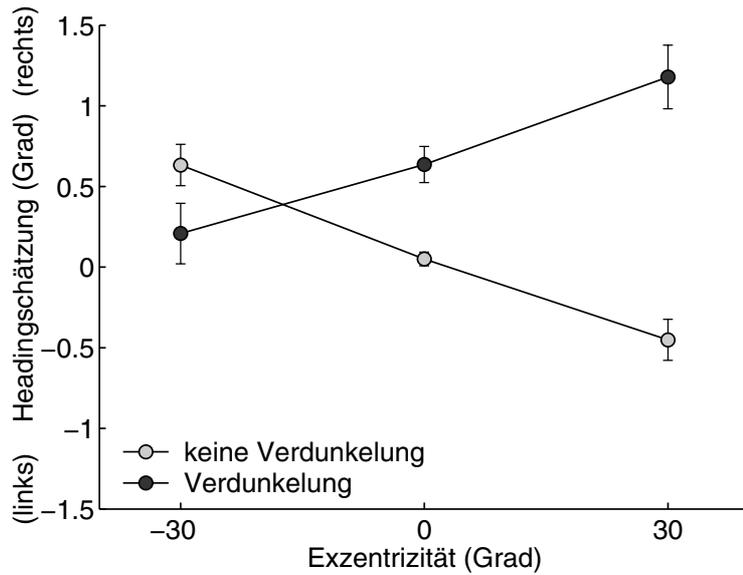


Abbildung 5.3. Effekt der Richtung des irrelevanten Expansionsfokus (iFOE) in Abhängigkeit von der Sichtbedingung während der Antwortabgabe. Bei einer Exzentrizität des iFOE von 30° bewegt sich das Schneefeld nach links. Positive Headingschätzungen weisen nach rechts vom Betrachter. Fehlerbalken repräsentieren ± 1 Standardschätzfehler der Mittelwerte.

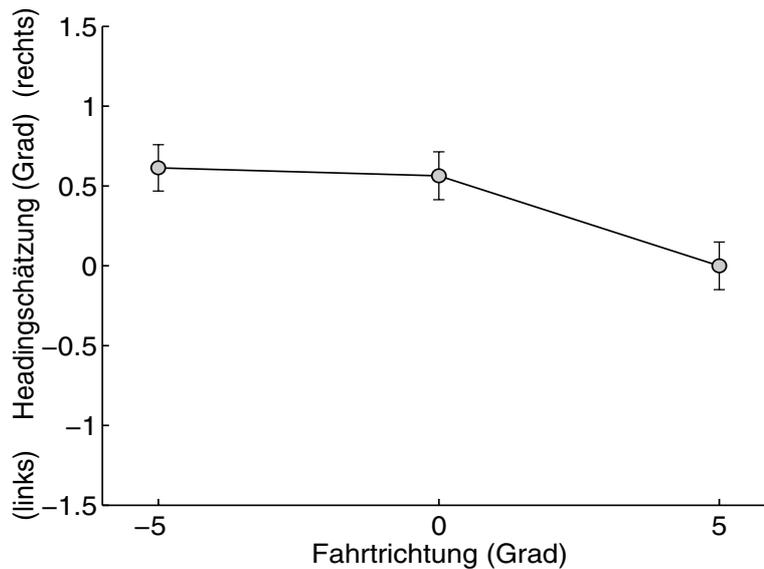


Abbildung 5.4. Effekt der Fahrtrichtung auf die Headingschätzung. Der negative Zusammenhang zwischen Fahrtrichtung und Headingschätzung bedeutet, dass bei exzentrischer Lage der Straße die Bewegungsrichtung tendenziell zur Leinwandmitte geschätzt wird.

Headingurteil (siehe Abbildung 5.4.). In erster Linie scheinen sich die Headingurteile dann von den anderen zu unterscheiden, wenn die Straße rechts liegt. Allerdings fielen die Einzelvergleiche der Mittelwerte unter dem Faktor Fahrtrichtung nicht signifikant aus (Scheffé-Test, $p > 0.05$). In einer nachfolgenden Analyse wurden die Headingurteile nach der Sichtbedingung

(Dunkelheit oder ohne Straße) getrennt, und separaten Varianzanalysen unterzogen. Betrachtet man dann nur die Versuchsdurchgänge mit einer Verdunkelung des Szene bei der Antwortabgabe, zeigten sich keine signifikanten Effekte. Der Effekt der iFOE-Richtung zeigte sich nur als Tendenz, $F(1,5) = 6.33$, $p = 0.053$. Innerhalb der Durchgänge, in denen während der Antwortabgabe nur die Straße entfernt wurde, zeigte sich als einziger Haupteffekt die iFOE-Richtung signifikant, $F(1,5) = 19.17$, $p = 0.007$. Es ließ sich dabei ein mittlerer Fehler in der Schätzung der Headingrichtung von etwa einem halben Grad feststellen (0.542°).

Zusammenfassung und Diskussion

Es wurde festgestellt, dass die Schätzung der Bewegungsrichtung (Heading) systematisch beeinflusst wurde, wenn das für die Aufgabe relevante Flussfeld der Bodentextur mit einem irrelevanten Flussfeld überlagert wurde, welches eine laterale Geschwindigkeitskomponente enthielt. Die Richtung der Beeinflussung hing dabei wesentlich von den Sichtbedingungen während der Antwortabgabe ab.

Wenn die Vorwärtsbewegung während der Antwortabgabe nicht sichtbar war, und somit der laterale Fluss des Schneefeldes auf den Fahrer nicht mehr einwirkte, fand man tendenziell einen Fehler, welcher entgegen der Bewegung des Schneefeldes gerichtet war. Es sei anzumerken, dass dieser Befund, wenn auch auf den ersten Blick naheliegend, nicht mit der Idee eines Bewegungsnacheffektes erklärt werden kann. Dazu diese Betrachtung: Während der Exposition/Inspektion sieht der Fahrer eine Schneefeldbewegung von links nach rechts. In der anschließenden Dunkelheitsphase würde man einen Nacheffekt erwarten, der von rechts nach links geht, und dazu führen könnte, dass die Zielmarkierung eine scheinbare Bewegung nach links zu vollziehen scheint. Diese Scheinbewegung sollte dann aber vom Beobachter kompensiert werden. Man würde erwarten, dass er tendenziell mehr nach rechts zielt. Gegen einen Bewegungsnacheffekt spricht auch, dass dieser für gewöhnlich eine längere Aufbauzeit hat, als die Dauer der Exposition von 10 Sekunden vor der ersten Schätzung. Auf diesen Effekt wird am Ende des Kapitels noch genauer eingegangen.

Die hier relevantere Bedingung für eine mögliche Erklärung des Zusteuerereffektes zum irrelevanten Expansionsfokus beim aktiven Fahren ist jedoch diejenige, bei der die Vorwärts- und die seitliche Schneefeldbewegung weiterhin sichtbar blieb. Diese Bedingung entsprach weitgehend der visuellen Stimulation bei der die Fahrer aktiv die Spur halten mussten. In dieser Bedingung fand man, dass die Headingschätzungen in Richtung der Bewegung des irrelevanten Flussfeldes beeinflusst wurden. Diese fehlerbehaftete Schätzung der Fahrtrichtung kann dann erklären, warum die Fahrer schließ-

lich entgegen der Bewegung des Flussfeldes - zum irrelevanten FOE - lenken. Wenn beispielsweise aufgrund der rechtsgerichteten Schneefeldbewegung, die Fahrer den Eindruck haben, nicht geradeaus, sondern in eine Richtung rechts vom Straßenverlauf zu steuern, werden sie dies damit korrigieren, in dem sie nach links lenken. Das Ergebnis ist dann eine Veränderung der lateralen Position nach links.

Diese Ergebnisse erweitern die Beobachtung von Duffy und Wurtz (1993) und Pack und Mingolla (1998), da sie zeigen, dass nicht nur die Lage des Expansionsfokus mit einem zweiten, überlagerten Flussfeld eine illusorische Verschiebung erfährt, sondern auch die empfundene Bewegungsrichtung in diese Richtung verschoben wird. Dieser Zusammenhang der Verschiebung des FOE und der Bewegungsrichtung ist augenfällig aber nicht notwendigerweise zwingend.

Die Proponenten der Optischen-Fluss-Theorie für die Lokomotion könnten argumentieren, dass dieser enge Zusammenhang aus zwei Beobachtungen gewährleistet zu sein scheint. Ein systematischer Headingfehler ist dann zu beobachten, wenn ein bewegtes Objekt den Expansionsfokus verdeckt, oder ein teilweise transparentes Objekt über den Expansionsfokus wandert (Royden & Hildreth, 1996; Warren & Saunders, 1995). In dieser Beziehung gleichen sich diese zwei Studien mit den Untersuchungen zur illusorischen Verschiebung des FOE. Weiterhin ist die Diskriminationsleistung bei einer Headingschätzung besser, wenn der FOE sichtbar ist, als bei einem FOE der außerhalb des Bildschirms liegt (Crowell & Banks, 1993). Die hiesigen Befunde würden gut dazu passen. Das irrelevante Flussfeld liegt sozusagen „transparent“ über dem relevanten, damit auch über dem relevanten FOE. Eine systematische Verschiebung des FOE, wird dann unmittelbar auch als eine geänderte Bewegungsrichtung interpretiert.

Skeptiker könnten einwenden, dass die Fehler bei der Angabe des FOE und die Fehler in der Headingrichtungsschätzung lediglich nur die Richtung gemeinsam haben. Allein auf dieser Grundlage dürfte man dann nicht automatisch schließen, dass eine Verschiebung des FOE gleichbedeutend sei mit einer Verschiebung der Headingrichtung. Für das Phänomen, das hier erklärt werden soll, genügt jedoch die Tatsache, dass eine Verschiebung des Heading stattfindet. Weitaus problematischer ist das Argument, dass selbst ein sicherer Headingfehler aufgrund der Schneefeldbewegung nicht in unmittelbarer Beziehung zum Fahrverhalten stehen muss. Das letzte Argument folgt der allgemeinen Linie, dass die Verwendung eines Hinweisreizes nicht notwendigerweise aus der Tatsache folgt, dass die Menschen die Sensitivität besitzen, den Hinweisreiz zu beachten, wenn sie dazu aufgefordert werden. In den zitierten Studien zur illusorischen Verschiebung des FOE wurden nicht selten Urteile abgegeben, die einen Fehler von über 10° hatten.

Eine Studie berichtet allerdings von FOE-Verschiebungen, die im Durchschnitt über mehrere Personen unter 1° lag (Meese et al., 1995). Im Vergleich dazu fällt der hier gefundene Headingfehler mit ca. 0.5° klein aus. Allerdings liegen die Unterschiede auch auf der Hand. Das irrelevante Flussfeld war hier nicht planar, wie bei einer Rotation um die Hochachse. Das irrelevante Flussfeld umfasste nicht den gesamten Sichtbereich, sondern lag im wesentlichen getrennt über dem Flussfeld des Grundes in der oberen Bildhälfte. Schließlich unterschieden sich die Elemente, welche die irrelevante Bewegung verursachten, durch ihre Farbe, Form, usw. klar von der restlichen Szene, während die Unterscheidung bei einem reinen Punktemuster nur über die Bewegung des Elementes geschehen kann.

Es scheint sinnvoll die Größe des Headingfehlers mit den Headingfehlern der Studien zu vergleichen, die ebenfalls eine Headingschätzung von den Probanden verlangten. Die Studie von Royden und Hildreth (1996), in der eine Tendenz in die Bewegungsrichtung eines Objektes gefunden wurde, berichtet über mehrere Personen gemittelte maximale Fehler von 0.9° . Die Untersuchung von Warren und Saunders (1995) lieferte Fehler von 1.9° bei einem transparenten Objekt - allerdings gegen die Bewegungsrichtung. Diese Werte korrespondieren besser zu den hier beobachteten Headingfehlern.

Doch wie steht der kleine Fehler von einem halben Grad mit der lateralen Abweichung in Beziehung? Ist dieser kleine Effekt ausreichend um die Daten im Schneesturm-Experiment zu erklären? Dazu wurde im Schneesturm-Experiment (Kap. 4) die maximale laterale Geschwindigkeit nach Einsetzen der lateralen Schneefeldbewegung jedes Durchgangs berechnen, und in Form eines Headingfehlers ausgedrückt, d.h. in Winkelabweichungen von der Geradeausfahrt. Man erhielt Winkel für verschiedene Vorwärtsgeschwindigkeiten und Lagen des iFOE, die zwischen 0.54° und 0.65° lagen. Wohlgermerkt waren das Mittelwerte der jeweiligen Maximalwerte. Schaut man sich dagegen eine durchschnittliche laterale Geschwindigkeit in einem Zeitfenster von 3 bis 5 Sekunden nach der Schneefeldbewegung an, findet man durchschnittliche Abweichungen von der Geradeausfahrt zwischen 0.21° und 0.31° . In beiden Berechnungen scheint die Vorwärtsgeschwindigkeit dabei keine große Bedeutung zu haben. Aus diesem Vergleich heraus scheint es dann gewährleistet zu sein anzunehmen, dass ein mittlerer Headingfehler von 0.5° zu der beobachteten seitlichen Abweichung führen kann.

Kann dieses Experiment Hinweise liefern, die zwischen der Augenbewegungsinterpretation und einer Interpretation gemäß einer induzierten Bewegung trennen können? Zwei Befunde sind in diesem Zusammenhang relevant. Die illusorische Verschiebung der Headingrichtung wurde mit einem überlagerten Flussfeld erzielt, welches, genau wie das Flussfeld des Bodens, expandierte und Tiefeninformation besaß. Dementsprechend waren

die Geschwindigkeitsvektoren dieses Schneefeldes weder parallel, noch hatten sie gleiche Länge. Beide Eigenschaften jedoch kennzeichnen ein Flussfeld, das bei Augenbewegungen entsteht. Insofern dürfte dieses Muster nicht als Signal für Augenbewegungen interpretiert werden, wie es Duffy und Wurtz (1993) vorgeschlagen haben. Der zweite Befund betrifft den Headingfehler bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Um die Exzentrizität des irrelevanten Expansionsfokus beizubehalten hing in diesem Experiment die seitliche Schneefeldgeschwindigkeit von der Vorwärtsgeschwindigkeit ab. Es konnte nicht gezeigt werden, dass sich der Headingfehler in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ändert. Nun sollte ein nicht signifikantes Ergebnis eines Faktors nicht so interpretiert werden, als sei dessen Wirkung damit ausgeschlossen. Gehen wir aber dennoch davon aus, dass die Geschwindigkeit tatsächlich keinen Einfluss hat, so würde dies ebenfalls der Augenbewegungsinterpretation widersprechen. Da man eine höhere seitliche Geschwindigkeit für eine größere Augenbewegung halten sollte, sollte man daraufhin stärker kompensieren.

Beide Befunde sind mit der Interpretation der induzierten Bewegung jedoch einfach zu vereinbaren. Die induzierte Bewegung, die vom bewegten Schneefeld ausgeht, kann lokal in verschiedene Richtungen zeigen. Fasst man die induzierte Bewegung als Vektorsubtraktion zwischen zwei optischen Flussfeldern auf, entsteht auch bei induzierter Bewegung zwischen zwei expandierenden Flussfeldern wiederum ein annähernd expandierendes Muster, welches jedoch einen verschobenen FOE besitzt (Abbildung 5.5.). Nach der Idee der Vektorsubtraktion würde man sogar vorhersagen, dass die Verschiebung des FOE sich bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten *nicht* ändern darf. Bei höherer Vorwärtsgeschwindigkeit und gleichzeitig höherer Schneefeldbewegung ergibt sich nur eine Verlängerung der Vektoren: Die Richtung der Vektoren wird nicht verändert, und somit resultiert eine gleich große Versetzung des FOE. Ein gleich großer Headingfehler bei unterschiedlichen lateralen Schneefeldgeschwindigkeiten wäre dann direkt zu erwarten. In Übereinstimmung damit, zeigen sich im Schneesturm-Experiment (Kap. 4) bei einer höheren Geschwindigkeit zwar größere laterale Abweichungen, werden diese aber in Winkelfehler umgerechnet, zeigen sich keine Unterschiede. Die Ergebnisse sind dann konsistent mit der Vorstellung, dass auf einen illusorischen FOE zugesteuert wird, der einen konstanten Versatz zur Straßenrichtung hat. Interessanterweise sind solche Modelle zur Headingbestimmung, die eine Vektorsubtraktion verwenden, um die rotatorische Komponente aus dem optischen Fluss zu eliminieren (Hildreth, 1992; Longuet-Higgins & Prazdny, 1980; Rieger & Lawton, 1985; Royden & Hildreth, 1996), augenscheinlich in der Lage, die erzielten Befunden zu erklären. So könnte der verschobene FOE und der Fehler in der Bewegungs-

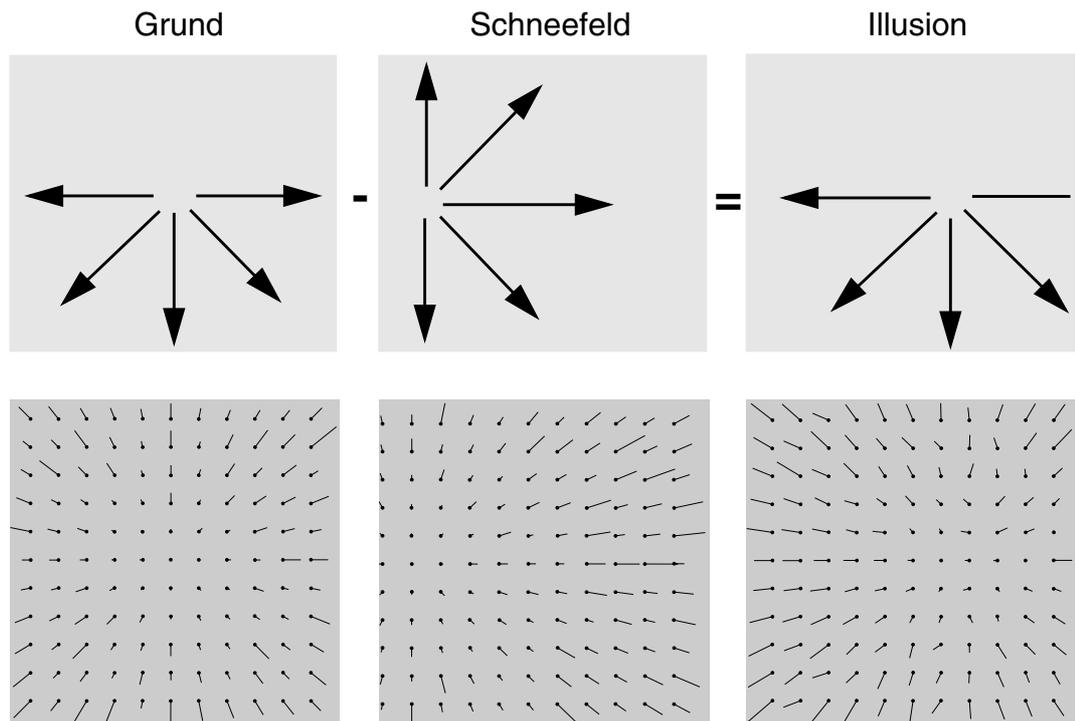


Abbildung 5.5. Vektorsubtraktion zweier expandierender Flussfelder schematisch (oben) und exakt (unten). Die Berechnung ging von zwei Punktevolumen gleicher Tiefe aus. Jeder Geschwindigkeitsvektor der mittleren 11x11-Matrix wurde von der linken Matrix abgezogen. Durch die Vektorsubtraktion verschiebt sich der FOE der resultierenden Flussfelds nach rechts (rechter Graph). Durch die Verrechnung von Geschwindigkeitsvektoren in unterschiedlicher Tiefe wird die radiale Struktur gestört. Dies könnte nachfolgend noch kompensiert werden, wenn die Geschwindigkeitsvektoren lokal über einen kleinen Bereich gemittelt werden.

schätzung dann tatsächlich als ein spezifisches Resultat des Headingberechnungsprozesses gesehen werden.

Es wurden inzwischen auch andere Ergebnisse von Headingschätzungen bei zwei dreidimensionalen, überlagerten Flussfeldern berichtet, die mit den hier gewonnenen Beobachtungen konsistent sind (Dyre, Kludt, & Fournier, 2002). Diese Studie findet ebenfalls eine systematische Verschiebung der Bewegungsrichtung, so dass man sagen kann, dass eine planare Struktur des Flussfelds keine notwendige Voraussetzung für diese Illusion ist, und nicht nur die Lage des FOE sondern auch das Headingurteil beeinflusst wird. Die Autoren erklären ihre Befunde schließlich ebenfalls mit Hilfe der induzierten Bewegung und dem Modell der Vektorsubtraktion.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine seitliche, großflächige Schneefeldbewegung sowohl die wahrgenommene Lage des Expansionsfokus wie auch die Headingschätzung in gleicher Richtung beeinflusst. Die dabei auftretenden Headingfehler stehen in guter Übereinstimmung mit der

beobachteten lateralen Abweichung aus den vorigen Experimenten, in denen die Fahrer aktiv ihre Position kontrollierten. Schließlich scheint eine planare Struktur des überlagerten Flussfeldes nicht notwendig zu sein, und die Ergebnisse stützen insgesamt eine Interpretation, nach der diese illusorische Verschiebung auf induzierte Bewegung zurück zu führen ist.

Die ausgemachten Kritiker der Optischen-Fluss-Erklärung könnten schließlich einwenden, dass zwar ein systematischer Headingfehler durch eine solche laterale großflächige Bewegung induziert wird, aber der eigentliche Grund für den systematischen Fahrfehler woanders zu suchen ist. Die seitliche Bewegung des Schneefeldes könnte beim Beobachter eine veränderte Wahrnehmung seiner subjektiven Geradeaus-Richtung (apparent straight ahead, ASA) ausgelöst haben (Rushton & Salvucci, 2001). Diese alternative Interpretation genauer zu betrachten ist Inhalt des nachfolgenden Abschnitts.

ASA - subjektives Geradeaus

Die visuelle egozentrische Lokalisation von Objekten in der Umwelt ist für das alltägliche motorische zielgerichtete Handeln ein äußerst wichtiger Prozess. Die Bedeutung erkennt man daran, dass wenn die egozentrische Lage künstlich verändert wird, zielgerichtetes Handeln anfangs enorm erschwert wird oder ganz versagt. Eine große Anzahl an experimentellen Arbeiten im Bereich der sensomotorischen Adaptation zeugen davon, in dem sie die Methode der prismatischen Verzerrung verwendeten. Dabei wird durch das Tragen einer Prismenbrille beispielsweise die Lage eines Objektes für eine Person versetzt, was dazu führt, dass die Person in die Richtung greift, in der sie das Objekt in egozentrischen Koordinaten sieht, und es folglich verfehlt. Es erfordert ein gewisse Zeit und einiges an Übung um sich auf solche Veränderung einzustellen (ein schöne Einführung ist Welch, 1978).

Die Fähigkeit, Objekte in einem egozentrischen Koordinatensystem zu lokalisieren, impliziert, dass es auch möglich ist angeben zu können, in welcher Richtung bezüglich unseres Körper *geradeaus* liegt. Dafür wurde von Dichgans und Brandt (1978) der Begriff des *subjektiven Geradeaus* geprägt, als deutsche Bezeichnung für das englische *apparent straight ahead* (ASA). Im folgenden soll ASA als Akronym für die Lage des subjektiven Geradeaus stehen. Die Adjektive „subjektiv“ bzw. „apparent“ deuten darauf hin, dass die Richtung, die als Geradeaus empfunden wird, veränderbar ist. Davon wird im übernächsten Abschnitt noch die Rede sein.

Egozentrische Lokalisation als Alternative zum optischen Fluss

Wenn es zur Interaktion mit Objekten einer zuverlässigen egozentrischen Lokalisation bedarf, ist dann diese Fähigkeit nur im Nahbereich notwendig, oder ist sie auch von Bedeutung für weiter entfernte Ziele, weit außerhalb des Greifraumes? Bezogen auf die Frage, welche Hinweisreize zur Kontrolle der Lokomotion benutzt werden, wurde die egozentrische Lokalisation als Alternative zur Optischen-Fluss-Theorie vorgeschlagen. In einer einfachen aber folgenreichen Untersuchung lieferten Rushton und seine Kollegen einen ersten deutlichen Beleg (Rushton et al., 1998). Die Interpretation dieser Befunde rief sowohl bei den Advokaten der Optischen-Fluss-Theorie wie auch bei den Gegnern zahlreiche Reaktionen hervor (siehe Korrespondenzteile in *Trends in Cognitive Sciences*, 3(12), 1999, S. 449-450; und 5(1), 2001, S. 6-9).

In dieser Studie wurde der Weg von Versuchspersonen bestimmt, die zu einem stationären Ziel laufen mussten, wobei jedoch die scheinbare Position des Ziels durch das Tragen einer Prismenbrille verändert wurde (Rushton et al., 1998). Die Autoren beobachteten, dass die Versuchspersonen anfangs diejenige Richtung einschlugen, die mit der scheinbaren Position des Ziels übereinstimmte. Befanden sie sich dann in der Vorwärtsbewegung, regulierten die Personen ihre Laufrichtung so, dass das Ziel immer mit ihrem ASA übereinstimmte. Sie versuchten also das Ziel über die gesamte Laufstrecke direkt anzulaufen. Die Strecke von Anfangs- bis Zielpunkt resultierte somit in einem gekrümmten Weg. Die Autoren fanden keinen Hinweis, der die Nutzung von optischem Fluss nahelegen konnte: Während der Vorwärtsbewegung hätten die Personen auf eine optische Fluss Strategie umsteigen können, nach welcher beispielsweise diejenige Richtung eingeschlagen wird, die das Ziel mit dem Expansionsfokus zur Deckung bringt. Stattdessen ermittelten die Autoren, dass zu jedem Zeitpunkt auf dem Weg zum Ziel, die aktuelle Laufrichtung in etwa um den gleichen Winkel vom Ziel abwich, um den auch die Umwelt durch die Prismenbrille versetzt wurde (siehe auch Abbildung 5.6.).

Gemäß der starken Version der egozentrischen Erklärung für die Kontrolle der Lokomotion wird postuliert, dass die einzige Information, die man benötigt, die wahrgenommene egozentrische Richtung des Ziels ist. Oder anders gesagt: Man gelangt von hier nach dort, indem man sich zum „dort“ ausrichtet und einfach darauf zu läuft.

Diese Arbeit in der Folge stark kritisiert worden. Die Kritik betraf in erster Linie die verwendete Methode und zentrierte um drei Punkte. Erstens hatten die Probanden, als sie loslaufen mussten, nur Informationen über die Richtung des Ziels, deshalb war ein Anfangsfehler unausweichlich. Erst

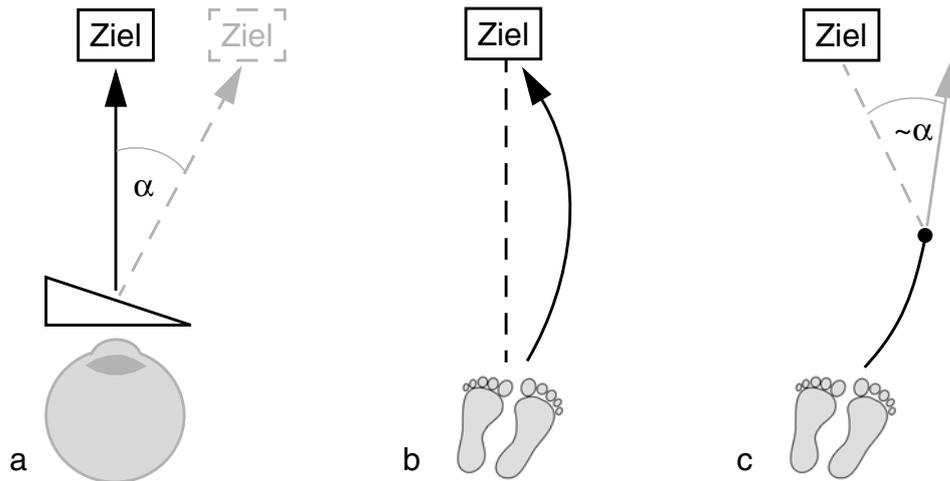


Abbildung 5.6. Lokomotion während prismatischer Versetzung. a: Ein Prismenkeil versetzt die scheinbare Richtung eines anzusteuerten Ziels um einen Winkel α (im Experiment von Rushton et al., 1998, war $\alpha = 16^\circ$). b: Aufgrund der wahrgenommenen Richtung laufen die Versuchspersonen auf gekrümmten Wegen zum Ziel. c: Der Winkel zwischen der momentanen lokomotorischen Achse und der tatsächlichen Lage des Ziels, entspricht zu jedem Zeitpunkt ungefähr dem Winkel α .

während der späteren Eigenbewegung konnte überhaupt optischer Fluss genutzt werden. Zweitens wurde das Experiment auf einer Rasenfläche durchgeführt, die wenig Kontrast besaß und wenig optischen Fluss erzeugte. Drittens verursachen Keilprismen, wie sie benutzt worden sind, außer der Versetzung der Szene, asymmetrische Verzerrungen innerhalb des Bildes. Auf der Seite des Prismenspitze (Apex) wird das Bild gedehnt, und auf der Seite der Prismenbasis komprimiert. Ferner fehlt ein kleiner exzentrischer Bildbereich auf der Apexseite. Da durch diese Verzerrungen vor allem der periphere optische Fluss verändert wird, wird auch jede flussbasierte Strategie beeinflusst, die nicht nur den Expansionsfokus, sondern die gesamte Struktur des optischen Flusses verwendet (Lappe, Bremmer, & van den Berg, 1999a).

Folgerichtig entstanden weitere Arbeiten, die die starke Version der egozentrischen Erklärung herausforderten. Die drei bis zum jetzigen Zeitpunkt publizierten Zeitschriftenartikel ziehen allesamt den gleichen Schluss: Die egozentrische Lage eines Ziels und der optische Fluss werden gleichzeitig verwendet. Im Normalfall stehen beide Informationsquellen in keinem Konflikt, da sie die gleiche Richtung anzeigen. Bietet die Umgebung reichhaltigen optischen Fluss an, dann wird eher optischer Fluss verwendet und in einer wenig strukturierten Umwelt richten sich die Personen eher nach der egozentrischen Richtung aus (Harris & Carre, 2001; Warren et al., 2001; Wood et al., 2000).

Beeinflussung des subjektiven Geradeaus

Das subjektive Geradeaus (ASA) wird als eine Richtung in der medialen Ebene einer Person aufgefasst, die am Rumpf der Person zentriert ist. Die Bestimmung des ASA ist dabei vergleichsweise einfach. Probanden müssen mit einem Zeigeeinstrument geradeaus auf eine Wand zeigen, oder eher indirekt, eine sichtbare Markierung auf einer Wand oder einem Bildschirm in die gewünschte Position bewegen. Mit diesen Verfahren wurde in der Vergangenheit in einer Reihe von Arbeiten festgestellt, dass das ASA unter bestimmten Umständen veränderbar ist. Das ASA und die egozentrische Position von Objekten kann sich beispielsweise während der Augenbewegungen und bei exzentrischen Augenfixationen verschieben (Lewald & Ehrenstein, 2000; Morgan, 1978). Bei anhaltender Fixation nach links, verschiebt sich auch das subjektive Geradeaus nach links. Durch Druck auf das Auge (Bridgeman & Graziano, 1989), durch Vibration der Nackenmuskeln oder durch kalorische Stimulation des Ohrs (Karnath, Sievering, & Fetter, 1994) wurden ebenfalls solche Effekte erzielt.

Im Zusammenhang mit der egozentrischen Erklärung der Lokomotionskontrolle wurde die Hypothese formuliert, ob die Ergebnisse, die auf eine systematische Wirkung des optischen Flusses hindeuten, eventuell durch eine implizite Beeinflussung des ASA zu Stande gekommen sind. Nach dieser Hypothese wäre dann die Wirkung des optischen Flusses nur indirekt und nicht ursächlich (Rushton & Salvucci, 2001). Es ist schon seit längerem bekannt, dass durch rein visuelle Stimulation die empfundene Körperlage und das ASA beeinflusst werden können. (Bei exzentrischen Augenpositionen und Augenbewegungen sind die Ursachen dabei *nicht -visueller* Natur, da die Verschiebung wahrscheinlich über die Augenmuskeln vermittelt wird). Dietzel und Roelofs¹ beobachteten unabhängig voneinander das nach ihnen benannte Phänomen, dass das ASA jeweils eine Tendenz zur Mitte eines visuellen Stimulus hat (zitiert nach Bridgeman, Peery, & Anand, 1997; Bruell & Albee, 1955). Aber auch mit dynamischen visuellen Stimuli wurde eine Beeinflussung gezeigt. In Studien zur zirkulären Vektion konnte, neben der Empfindung von Eigenrotation auch eine Verschiebung des ASA in Richtung der Rotationsbewegung der Trommel gemessen werden (Brecher, Brecher, Kommerell, Sauter, & Sellerbeck, 1972; Dichgans & Brandt, 1978). In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der optokinetischen Stimulation konnte eine Verschiebung des ASA bis zu ca. 10° erreicht werden.

1) Roelofs, C. O. (1935). Optische Lokalisation. *Arch. Augenheilk.*, 109, 395-415.

Dietzel, H. (1924). Untersuchungen über die optische Lokalisation der Mediane. *Z. f. Biol.*, 80, 289 - 316.

Post und Heckmann (1986) verglichen den zeitlichen Verlauf von induzierter Bewegung und ASA und fanden ebenso eine Verschiebung des ASA in Richtung des bewegenden Hintergrunds. Die Verschiebung des ASA erfolgte dabei nicht sprunghaft, sondern konnte über einen Zeitraum von bis zu einer Minute auf eine Abweichung von 20° zunehmen. Wurde die Hintergrundbewegung angehalten, benötigte die Rückführung des ASA auf die ursprüngliche Richtung einen vergleichbaren Zeitraum. Ziel dieses Experiments war es, zwischen zwei Interpretationen der induzierten Bewegung zu unterscheiden: der *objekt-relativen* und der *subjekt-relativen* Erklärung (Brosigole, 1968). Nach der objekt-relativen Interpretation, sieht man induzierte Bewegung, weil sich ein Objekt und ein Hintergrund relativ zueinander bewegen. Wird der Hintergrund vom Beobachter als stationär interpretiert, kann sich folglich nur das Objekt bewegt haben. Die subjekt-relative Interpretation dagegen nimmt an, dass der bewegte Hintergrund das subjektive Geradeaus der beobachtenden Person in die gleiche Richtung verschiebt. Relativ zu dieser, nun verschobenen, Geradeaus-Richtung scheint das Objekt eine Bewegung in Gegenrichtung gemacht zu haben. Zwar finden Post und Heckmann (1986) eine Verschiebung des ASA, doch diese kann nicht die subjekt-relative Interpretation stützen. Während die Verschiebung der Geradeaus-Richtung eine Sättigung erreichte, finden die Autoren dass, die Empfindung der induzierten Bewegung weiterhin anhielt.

Die Hypothese für das nachfolgende Experiment war, ausgehend von der geschilderten Evidenz für eine Beeinflussung des ASA, auch unter den Bedingungen des Schneesturm-Experiments (Kap. 4) zu prüfen, ob eine solche Verschiebung auftritt und welche Größe diese besitzt. Ebenso sollte der zeitliche Verlauf durch wiederholte Messungen beobachtet werden. Die erzielten Ergebnisse lassen sich dann direkt mit den Ergebnissen des vorigen Experimentes zur Headingschätzung vergleichen. Der einzige wesentliche Unterschied zum vorigen Experiment lag in der Instruktion der Probanden. Hier sollten sie einfach die Markierung auf der Leinwand so positionieren, dass sie exakt in ihrer subjektiven Geradeaus-Richtung lag.

Methoden

Bis auf zwei Unterschiede entspricht die Versuchsdurchführung exakt den Methoden im vorigen Experiment zur Headingschätzung (siehe Seite 128 ff). Die Versuchspersonen wurden instruiert, eine erscheinende Markierung genau in ihre *Geradeaus-Richtung* zu platzieren. Die Dauer eines Durchgangs betrug hier ca. 120-140 Sekunden. In dieser Zeit wurden 6 ASA-Schätzungen während der lateralen Schneefeldbewegung abgegeben, und anschließend 6 Schätzungen bei einem rein radialen Schneefeld ohne seitliche Bewegung. Während im vorigen Experiment die Straße drei Orientie-

rungen bezüglich der Leinwandmitte hatte, wurde hier die Straße immer zentral präsentiert. Alle restlichen experimentellen Faktoren waren gleich. Die Anzahl der Durchgänge wurde beibehalten, und wegen der Reduktion des experimentellen Designs um einen Faktor, konnten die Faktorstufenkombinationen drei Mal wiederholt werden.

Zehn Probanden wurden untersucht. Die Probanden saßen auf einem Stuhl, der zentral zur Leinwand ausgerichtet war. Sie wurden gebeten auf dem Stuhl möglichst aufrecht mit dem Rücken an der Rücklehne zu sitzen, diese Position während des Experiments beizubehalten und dabei immer beide Füße auf dem Boden zu lassen. Wie im vorigen Experiment trugen die Versuchspersonen ein präparierte Skibrille, die das Gesichtsfeld so einschränkte, dass nicht gleichzeitig die obere und untere Begrenzung der Leinwand sichtbar war.

Ergebnis ASA wird verändert

Die jeweils ersten 5 ASA-Angaben jedes Durchgangs wurden einer fünffaktoriellen Varianzanalyse unterzogen. Zwei Effekte waren signifikant. Es zeigte sich eine Interaktion zwischen der iFOE-Richtung (links bzw. rechts) und der Sichtbedingung (mit bzw. ohne Verdunkelung), $F(1,9) = 20.78$, $p = 0.001$. Eine Dreifach-Interaktion bestand zwischen der iFOE-Richtung, der Sichtbedingung und der Geschwindigkeit (10 bzw. 20 m/s), $F(1,9) = 5.80$, $p = 0.039$.

Eine getrennte Varianzanalyse folgte jeweils für die Bedingungen mit und ohne Verdunkelung. Bei den ASA-Angaben während der Verdunkelung ließen sich keine signifikanten Resultate aufzeigen (Faktor iFOE-Richtung hier, $p = 0.10$). Wurde während der Antwortabgabe nur die Straße entfernt, zeigten sich systematische Abweichungen der ASA-Angaben in Abhängigkeit von der iFOE-Richtung, $F(1,9) = 7.74$, $p = 0.021$. Eine Schneefeldbewegung nach links führte dazu, dass auch das ASA in die selbe Richtung verschoben wurde. In Abbildung 5.7. ist der Effekt der iFOE-Richtung in Abhängigkeit von den Sichtbedingungen bei Antwortabgabe dargestellt. Ähnlich wie bei den Headingschätzungen, zeigte sich eine Tendenz des ASA gegen die Schneefeldbewegung, wenn die Antwort bei Dunkelheit abgegeben wurde. Hielt die seitliche Schneefeldbewegung bei der Antwortabgabe dagegen an, dann zeigte sich ein systematischer ASA-Fehler in die Richtung des Schneefeldes, also entgegen des iFOE (Abbildung 5.7., helle Markierungen).

Über beide Richtungen gemittelt, wurde ein ASA-Fehler von 0.193° festgestellt. Dieser Richtungsfehler schien tendenziell von der gefahrenen Geschwindigkeit abhängig zu sein, und somit auch von der Geschwindig-

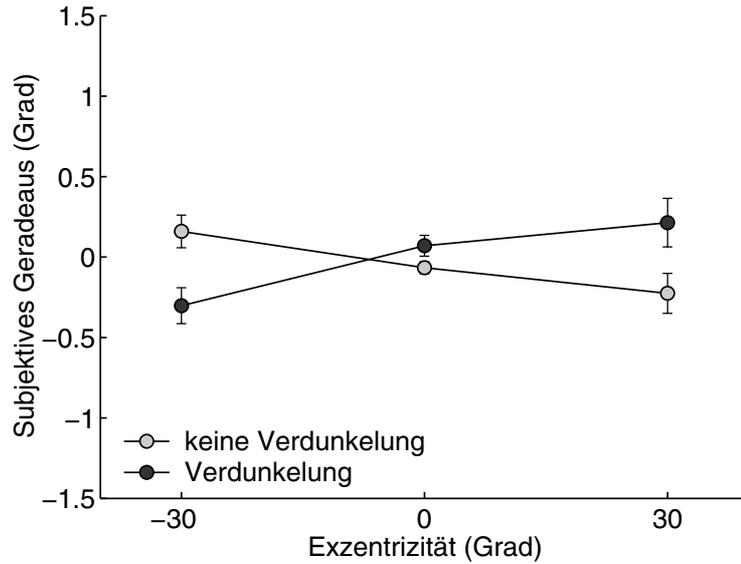


Abbildung 5.7. Veränderung des subjektiven Geradeaus (ASA) bei seitlicher Schneefeldbewegung in Abhängigkeit von der Sichtbedingung während der Antwortabgabe. Bei einer Exzentrizität des iFOE von 30° bewegt sich das Schneefeld nach links. Positive Gradangaben bedeuten rechts vom Betrachter. Fehlerbalken repräsentieren die Standardschätzfehler der Mittelwerte.

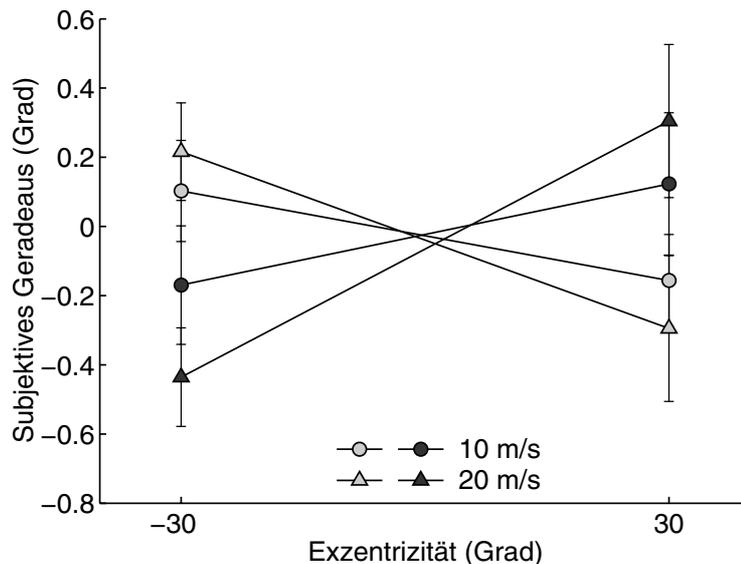


Abbildung 5.8. Interaktion der Faktoren Sichtbedingung, iFOE-Richtung und Geschwindigkeit. Dunkle Markierungen stellen Bedingungen mit Verdunkelung dar, helle Markierungen, Bedingungen, in denen nur die Straße entfernt wurde. Man erkennt, dass bei der höheren Geschwindigkeit die Fehler in den Schätzungen zunehmen. Winkel rechts von der Medianebene des Beobachters haben positive Gradangaben. Bei einer iFOE-Exzentrizität von 30° geht die Schneefeldbewegung von rechts nach links. Fehlerbalken repräsentieren die Standardschätzfehler der Mittelwerte

keit der Schneefeldbewegung. Statistisch war dieser Geschwindigkeitseffekt weder in den Bedingungen mit noch in den Bedingungen ohne Verdunke-

lung der Szenen signifikant ($p > 0.05$). Wie in Abbildung 5.8. allerdings zu sehen ist, werden unter allen Bedingungen jeweils die größeren Abweichung unter der höheren Geschwindigkeit beobachtet (dreieckige Symbole).

Zusammenfassung und Diskussion

Das zentrale Ergebnis dieses Experiments ist, dass während der seitlichen Schneefeldbewegung eine Verschiebung der wahrgenommenen Geradeaus-Richtung (ASA) zur gleichen Seite stattfand. Dieser systematische Fehler war allerdings recht klein, und liegt mehr als die Hälfte unter dem Fehler der bei einer Headingschätzung beobachtet wird.

Die Abhängigkeit des ASA-Fehlers von der Geschwindigkeit ist konsistent mit den Befunden in einer optokinetischen Trommel, in der die ASA-Verschiebung bis zu einer Rotationsgeschwindigkeit von ca. $100^\circ/\text{s}$ ansteigt (Brecher et al., 1972). Ein von der Geschwindigkeit abhängiger ASA-Fehler hätte, dann aber im Schneesturm-Experiment auch zu einem größeren Headingfehler während der Spurhaltung führen sollen, was nicht der Fall war (siehe Kap. 4). Die Beobachtung, dass der ASA-Fehler bei andauernder Präsentation zunimmt (Post & Heckmann, 1986), konnte hier nicht bestätigt werden. Es zeigte sich kein Effekt der Antwortposition innerhalb der Durchgänge. Ein Grund dafür könnte in der insgesamt geringen Größe des Effekts liegen.

Diskussion beider Experimente

Für die Interpretation der Befunde der aktiven Korrektur der Fahrer gegen die seitliche Schneefeldbewegung kann die Verschiebung des ASA nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die beobachtete Größe des ASA-Fehlers ($\sim 0.19^\circ$) ist jedoch kleiner als die mittleren Abweichungen von der Geradeausfahrt ($\sim 0.44^\circ$). Insofern kann der ASA-Fehler für die Änderung in der lateralen Position nicht vollständig verantwortlich gemacht werden, könnte wohl aber einen kleinen Teil des Effekts erklären. Dieses Experiment konnte demnach die starke Version der egozentrischen Erklärung der Kontrolle der Lokomotion nicht bestätigen, nach der jegliche Wirkung des optischen Flusses vollständig indirekt über eine Verschiebung des egozentrischen Koordinatensystems erfolgt soll (Rushton & Salvucci, 2001).

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden letzten Experimente miteinander, kann man den Schluss ziehen, dass eine Verschiebung der Headingrichtung mehr Erklärungspotential für das Zusteuern zu einem irrelevanten Expansionsfokus hat, als die Verschiebung des subjektiven Geradeaus. Nicht nur der Betrag der Headingverschiebung entspricht viel besser der Abwei-

chung von der Straßenmitte, sondern auch die Unabhängigkeit von der simulierten Geschwindigkeit.

Effektumkehrung bei Dunkelheit

In beiden letzten Experimenten wurde ferner festgestellt, dass die Verschiebung der wahrgenommenen Heading- und ASA-Richtung sich umkehrt, wenn die Antwort in Dunkelheit abgegeben wird. Dieser Effekt kann, wie in der Diskussion des Headingschätzungsexperiments dargelegt, nicht mit einem simplen Bewegungsnacheffekt erklärt werden, vielleicht aber mit Hilfe von anderen Nacheffekten.

Ein möglicher solcher Nacheffekt steht im Zusammenhang mit der Zirkularvektion. Zunächst soll nochmal festgehalten werden, dass eine Zirkularvektion die Ergebnisse der aktiven Steuerung unter der Schneefeldbewegung nicht erklären kann, da die vorhergesagten Effekte auf dieser Grundlage genau in entgegengesetzter Richtung zeigen müssten. Denn fasst man zum Beispiel eine seitliche Schneefeldbewegung nach links als einen Stimulus auf, der eine illusorische Eigenrotation bewirken könnte, dann müsste die Eigenrotation nach rechts weisen. Die kompensatorische Reaktion der Fahrer sollte dann nach links erfolgen, also in Richtung der Stimulusbewegung - tatsächlich korrigierten die Fahrer aber entgegen der Bewegungsrichtung des Stimulus. Andererseits wurde berichtet, dass die Empfindung der Eigenrotation damit begleitet wird, dass eine Verschiebung des ASA in Gegenrichtung zur illusorischen Drehung, d.h. jeweils in Richtung der Bewegung des optokinetischen Stimulus stattfindet (Brecher et al., 1972; Dichgans & Brandt, 1978). Die Zirkularvektion kann dabei auch nach Beendigung der Stimulation weiterbestehen. Entsprechend sollte die Verschiebung des ASA ebenfalls eine Zeit lang weiterbestehen. Wenn nach der Stimulation Dunkelheit herrscht, setzt sich eine Zirkularvektion in gleicher Richtung fort. Wenn aber der Stimulus angehalten wird, kann sich die Richtung der illusorischen Eigenrotation umkehren (Brandt et al., 1973). Die Frage ist nun mit welchen von beiden Bedingungen die Einführung der Dunkelheit während der ASA-Schätzung in diesem Experiment vergleichbar ist. Man sollte erwarten, dass die Verdunkelung in diesem Experiment der Verdunkelung in einer optokinetischen Trommel gleicht. Wenn dann eine Zirkularvektion und eine Verschiebung des ASA vorlag, hätten beide noch eine Zeitlang weiterbestehen müssen. Man hätte dann aber keinen Unterschied zu der Bedingung feststellen dürfen, in der nur die Straße verschwand. Da aber während der Dunkelheitsphase noch der Zielpunkt für die Richtungsschätzung sichtbar war, kann dieser als eine visuelle Referenz gewirkt haben. Somit kann eine Zirkularvektion und eine Verschiebung des ASA in Gegenrichtung verursacht worden sein, und erklären warum die Richtung der ASA bei (fast vollständiger) Dunkelheit sich umkehrte. Es sei

aber hinzugefügt, dass der Zielpunkt mit wenigen Grad Durchmesser im Vergleich zu einer angehaltenen optokinetischen Trommel sehr klein ist, und es zumindest fragwürdig erscheint, ob dieser quantitative Unterschied einen Vergleich zulässt. Ferner ist nicht bekannt, ob eine solch schnelle Umkehrung des ASA binnen weniger Sekunden überhaupt auftreten kann.

Wenn ein Stimulus eine Zirkularvektion auslöst, werden gewöhnlich auch systematischen Augenbewegungen ausgelöst. Solche okkulomotorischen Reaktionen können dann ebenfalls Nacheffekte besitzen. Wird eine großflächige Bewegung gezeigt, beobachtet man eine reflexive Bewegung der Augen, den sogenannten optokinetischen Nystagmus (OKN), der während seiner langsamen Phase in die Bewegungsrichtung des Stimulus läuft, und während seiner schnellen Phase, Sprünge (Sakkaden) in Gegenrichtung vollzieht. Bei plötzlich eintretender Dunkelheit kann auch einen Nacheffekt des optokinetischen Nystagmus beobachtet werden (OKAN - optokinetischer Nachnystagmus), der in die gleiche Richtung weist und beim Affen oder beim Menschen über einen Zeitraum von 20 bis 60 Sekunden anhält (Cohen, Matsuo, & Raphan, 1977; Waespe & Henn, 1977). Einen ähnlichen Nacheffekt kann man auch bei glatten Augenfolgebewegungen (pursuit) beobachten, wenn zuvor willentlich über einen gewissen Zeitraum ein Objekt verfolgt wurde. Auch hier setzt sich der Nacheffekt der Augenfolgebewegungen (pursuit afternystagmus, PAN) in gleicher Richtung fort (Muratore & Zee, 1979). Es wurde vermutet, dass bei einer Fixation der OKN und beide Nacheffekte (OKAN und PAN) unterdrückt werden müssen, und dies durch ein motorisches Signal an das Auge geschieht. Dieses efferente motorische Signal soll wahrnehmbar sein und ist sowohl für das Entstehen einer induzierten Bewegung (Heckmann & Post, 1988; Post & Leibowitz, 1985) wie auch für Bewegungsnacheffekte verantwortlich gemacht worden (Chaudhuri, 1990; Chaudhuri, 1991). Die Nacheffekte der okkulomotorischen Reaktionen nehmen kontinuierlich ab, und gelegentlich wird anschließend für eine kurze Zeit eine Richtungsänderung in diesen Nacheffekten beobachtet. Im Falle des OKAN schlägt die langsame Phase nunmehr entgegen der Richtung der ursprünglichen visuellen Großfeldbewegung, und zur Abgrenzung vom ersten optokinetischen Nachnystagmus wird diese okkulomotorische Reaktion auch negativer Nachnystagmus oder OKAN2 genannt (Brandt, Dichgans, & Büchele, 1974; Cohen et al., 1977). Nach Heckmann und Post (1988) wird der Übergang zu OKAN2 auch von einer Richtungsumkehr der induzierten Bewegung begleitet, die vor allem dann schnell eintritt, wenn vorher ein Punkt fixiert worden ist.

In unserem Experiment kann dies bedeuten, dass eine unmittelbar vorhergehende Schneefeldbewegung nach links dazu führte, dass der Zielpunkt bei der Antwortabgabe sich ebenfalls nach links zu bewegen schien.

Eine Kompensationsreaktion der Beobachter kann dazu geführt haben, dass die Geradeausrichtung dann tendenziell nach rechts angegeben wurde. In den Bedingungen, in denen die Antwort bei fortwährender Schneefeldbewegung abgegeben wurde, würde man wegen der andauernden Stimulation keine Richtungsumkehr einer potenziellen induzierten Bewegung erwarten.

Egozentrisches Koordinatensystem

Aufgrund der systematischen und bezüglich der Richtung korrespondierenden Fehler bei der Schätzung des Heading und der Geradeaus-Richtung könnte man vermuten, dass beide Schätzungen eine gemeinsame Basis haben, bzw. eine gemeinsame Ursache sich auf beide Schätzungen auswirkt. Eine mögliche gemeinsame Basis ist die Notwendigkeit beide Schätzungen in einem egozentrischen Koordinatensystem auszudrücken. Zwar ist es prinzipiell möglich die Bewegungsrichtung allozentrisch anzugeben, etwa in Bezug auf stationäre Objekte in der Umwelt, doch dies setzt eben andere Referenzobjekte voraus. In der Headingschätzungsaufgabe, wie sie hier umgesetzt wurde, musste die Bewegungsrichtung auf das körpereigene Koordinatensystem bezogen und memoriert werden, etwa als Abweichung von der Medianebene, um anschließend während der Antwortabgabe wieder auf diese Richtung zurück greifen zu können. Eine direkte Verschiebung des subjektiven Koordinatensystems oder eine indirekte Einwirkung auf das subjektive Koordinatensystem über eine induzierte Bewegung muss dann notwendigerweise beide Schätzungen beeinflussen.

Zwar wäre es interessant zu erfahren, ob bei einer Headingschätzungsaufgabe, die weniger ein egozentrisches Koordinatensystem betont, indem beispielweise in einer Zweifachwahlaufgabe nominal nach der Passierseite zu einem Referenzobjekt gefragt wird (siehe Warren et al., 1991), vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Man könnte dadurch zu einer Abschätzung gelangen, welchen Beitrag eine Verschiebung des subjektiven Geradeaus auf die Headingschätzung hat. Für die Frage, welche Reaktionen von Fahrern zu erwarten sind, wenn sie auf eine solche laterale Schneefeldbewegung treffen, ist der Ausgang eines solchen Experimentes jedoch eher weniger von Bedeutung. Für diese Frage ist entscheidend, dass die Reaktionen der Fahrer in einem egozentrischen Referenzrahmen geschehen müssen, und zwar gleichgültig davon, ob die Schätzung der Bewegungsrichtung nicht in egozentrischen Koordinaten erfolgt. Selbst wenn der Fahrer seine Bewegungsrichtung nur grob (nominal) und in Relation zu anderen Objekten bestimmt, muss er diese Information in der Regel in eine Korrekturbewegung übersetzen, der eine einfache Frage zugrunde liegt: Muss das Lenkrad mehr nach links oder mehr nach rechts gedreht werden? Da diese Entscheidung notwendigerweise in egozentrischen Koordinaten geschehen muss, ist nicht gänzlich auszuschließen, dass ein Teil der aktiven Korrektur gegen die

Schneefeldbewegung auch durch eine systematische Verschiebung der subjektiven Geradeausrichtung verursacht wird.

BLICK UND BEWEGUNGSRICHTUNG

In diesem Kapitel wird eine Replikation des Schneesturm-Experiments berichtet, in dem zusätzlich die Augenbewegungen und die Kopfstellung der Teilnehmer aufgenommen und analysiert wurden. Mit Hilfe dieser Variablen sollte geklärt werden, ob die seitliche Schneefeldbewegung einen systematischen Einfluss auf die Blickrichtung der Probanden hat, und diese wiederum aufgrund einer möglicherweise starken Kopplung zwischen Blick- und Fahrtrichtung die laterale Position der Fahrer beeinflusst. Die Resultate zeigen, dass bevor eine Lenkbewegung in eine bestimmte Richtung auftritt, eine Blickbewegung in die gleiche Richtung vorausgeht. Der Zusammenhang ist besonders groß in der Phase, in der die Fahrer auch auf die laterale Schneefeldbewegung mit einer lateralen Versetzung reagieren.

Okulomotorische Determinanten des Fahrfehlers

Die Blickbewegungen während der Lokomotion sind keineswegs zufällig, sondern zeigen eine systematische Struktur. Es existieren einige empirische Arbeiten, die eine enge Beziehung zwischen Augenbewegungen und verschiedenen anderen Handlungen einer Person zeigen, wobei die Augenbewegungen auch meist mit koordinierten Kopfbewegungen einher gehen.

Bewegt sich eine Person beispielsweise zu Fuß, ist der Blick die meiste Zeit auf Objekte ausgerichtet, die in der augenblicklichen Laufrichtung liegen. Wenn die Laufrichtung verändert werden soll, beobachtet man ausnahmslos Sakkaden in Richtung des intendierten zukünftigen Laufweges, die meist mit einer gleichzeitigen Reorientierung des Kopfes begleitet werden (Hollands, Patla, & Vickers, 2002). Die Reorientierungen des Kopfes und der Blickbewegung antizipieren dabei die Veränderung der Laufrichtung (Hollands, Sorensen, & Patla, 2001 2002; Imai, Moore, Raphan, & Cohen, 2001) und sind auch dann zu beobachten, wenn die Änderung der Laufrichtung mit geschlossenen Augen gemacht werden soll (Grasso, Prevost, Ivanenko, & Berthoz, 1998). Wenn während der Laufbewegung keine

Kopfbewegungen gemacht werden können, kompensieren die Personen diese Immobilität, in dem sie früher mit einer Laufrichtungsänderung beginnen. Eine Erklärung dafür ist, dass sie so mehr Zeit haben um die Kopfrichtung in die gewünschte Laufrichtung auszurichten (Hollands et al., 2001).

Antizipatorische Augenbewegungen vor einer nachfolgenden Handlung sind auch für alltägliche manuelle Handlungen gezeigt worden (Ballard, Hayhoe, Li, & Whitehead, 1992; Land, 1998; Pelz, Hayhoe, & Loeber, 2001). Beim Zubereiten einer Tasse Tee beispielweise wurde eine starke Koordination zwischen den Augenbewegungen und der Bewegung der Hand gezeigt, wobei die Augen der Handbewegung ca. eine halbe Sekunde vorausseilen (Land, 1998).

Augenbewegungen werden oft von Kopfbewegungen begleitet, wenn die Blickrichtung um einen großen Betrag verändert werden soll. Die gängige Erklärung dafür ist, dass der Nutzen dieser Kopfbewegung darin liegt, die Augenstellung relativ zum Kopf in einem optimalen Arbeitsbereich zu sichern, um auf diese Weise exzentrische Augenstellungen zu vermeiden. Die Amplitude einer sakkadischen Augenbewegung korrespondiert dabei sehr gut zur maximalen Rotationsgeschwindigkeit der Kopfbewegung, wobei die Initiierung beider Bewegungen ungefähr zur gleichen Zeit erfolgt (Land, 1992). Dass die starke Kopplung zwischen Augen- und Kopfbewegungen auch einen engen zeitlichen Zusammenhang hat, zeigte sich in Experimenten, in denen Sakkaden zu einer falschen Position ausgelöst wurden und anschließend korrigiert werden mussten. Diese inkorrekten Sakkaden werden auch unmittelbar von einer Kopfbewegung begleitet, und die Korrekturen der Blick- und Kopfrichtung werden noch während der Ausführung dieser inkorrekten Sakkade eingeleitet (Corneil, Hing, Bautista, & Munoz, 1999). Schließlich wurde gezeigt, dass Personen ihren Kopf nicht stillhalten können, wenn sie zur Seite blicken. Sie bewegen ihren Kopf systematisch so, dass Beobachter angeben können, in welche Richtung die betreffende Person blickt, auch ohne die Augen der Person sehen zu können (Doherty & Anderson, 2001).

Im Bereich der Steuerungskontrolle beim Fahren liegen ebenfalls einige Befunde zum systematischen Einsatz von Blickbewegungen vor. Beim Befahren einer leeren Straße schauen die Fahrer die meiste Zeit auf die Fahrbahn (Liu, 1998), wobei gelegentlich berichtet wurde, dass erfahrene Fahrer weiter voraus blicken und das periphere Sehen nutzen, um ihre Spurhaltung zu überwachen (Mourant & Rockwell, 1972). Neuere Arbeiten hingegen finden diese Trennung zwischen erfahrenen und unerfahrenen Fahrern nicht (Dishart & Land, 1998), oder zeigen sogar den umgekehrten Befund, dass die erfahrenen Fahrer eher an eine Position näher zum Fahrzeug blicken (Chapman & Underwood, 1998).

Weniger umstritten ist, dass auf gerader Straße, die meisten Fixationen in der Nähe des Expansionsfokus gerichtet sind (Reid, Solowka, & Billing, 1981; Shinar, McDowell, & Rockwell, 1977). Dies wurde auch bei Simulationen mit Zufallspunktemustern gezeigt, oder wenn Personen eine Vorwärtsbewegung über eine texturierte Oberfläche passiv beobachten mussten (Niemann, Lappe, Büscher, & Hoffmann, 1999). Warum blickt man in die Nähe des Expansionsfokus? Eine Interpretation ist, dass der Fahrer möglichst frühzeitig Informationen über potentielle Gefahren erhalten will. Die frühe Erkennung erlaubt dann maximale Zeit für eine Reaktionsvorbereitung. Eine andere Interpretation sieht dies im Zusammenhang mit einer besseren Headingschätzung im zentralen visuellen Feld (Warren & Kurtz, 1992). Wenn die Blickrichtung in der Nähe des Expansionsfokus liegt, könnten die Fahrer genauer ihre Fahrtrichtung abschätzen. Schließlich kann ein weiterer Grund darin liegen, dass das visuelle System den sogenannten *retinalen Slip* reduzieren will, da das Bild auf der Retina möglichst stabilisiert werden soll. Gleichzeitig soll die Richtung der Bewegung einzelner Elemente auf der Retina beibehalten werden und Scherbewegungen zwischen den Elementen vermieden werden. Diesen Kompromiss kann dadurch erreicht werden, indem die Augen der langsamsten Geschwindigkeit im visuellen Feld folgen (Mestre & Masson, 1997). Das bedeutet, dass dadurch die langsamste Geschwindigkeit vom retinalen Fluss subtrahiert wird.

Die stärkste Koordination von Augenbewegungen und Fahrverhalten wurde beim Befahren von Kurven festgestellt. Fahrer suchen den Tangentenpunkt einer Kurve ein bis zwei Sekunden bevor sie in die Kurve fahren und fixieren diesen während der Kurvenfahrt. Aus der Exzentrizität dieses Tangentenpunkts kann die Kurvigkeit ($1/\text{Radius}$) der vorausliegenden Straße bestimmt werden, und der erforderte Lenkwinkel folgt direkt der ermittelten Kurvigkeit (Land & Lee, 1994). Dabei ist eine hohe Korrelation zwischen Blickwinkel und Lenkraddrehung von ca. $r = 0.9$ ermittelt worden, wobei der Blickwinkel mit einem Zeitabstand (Lag) von 0.8 s führt (Land & Furneaux, 1997). Die Autoren argumentieren, dass diese starke Koordination vom Fahrer entkoppelt werden kann. Zwei Argumente werden dafür aufgeführt. Zum einen ist die Latenz bis zur Lenkradbewegung von 0.8 s viel länger als eine einfache Reaktionszeit von 0.3-0.4 s. Dies wird so interpretiert, dass die Information über die Blickbewegung in einem *Buffer* zwischengespeichert wird. Zum anderen lenken Fahrer nicht ständig jeweils in Richtung ihrer Blickbewegung, sondern in Abhängigkeit davon welches Objekt sie fixieren und von den Anforderungen der Aufgabe. Man findet beispielsweise keine Lenkreaktion, wenn der Blick auf einen vorausfahrenden Radfahrer liegt. Die Lenkreaktionen sind nur dann zu beobachten, wenn der Fahrer auf die Seitenlinien der Straße schaut (Land & Furneaux, 1997). Der Fahrer greift

danach nur auf den Buffer zu, wenn er die Information als relevant für seine Aufgabe betrachtet.

Von genau dieser Unterdrückung der engen Koordination zwischen der Blickrichtung und der Lenkreaktion gehen die Überlegungen zu dem hier beschriebenen Experiment aus. Was passiert, wenn der Fahrer diese Entkopplung unter manchen Bedingungen nicht vollständig bewerkstelligen kann? Die Vorhersage ist denkbar einfach: Wird die Blickrichtung systematisch zu einer Seite (entweder willentlich oder nicht willentlich) abgelenkt, müsste auch eine systematische Reaktion des Fahrers zur gleichen Seite zu beobachten sein, welche unter Umständen auch sehr klein sein kann.

Gibt es Hinweise auf eine solche systematische Reaktion in die Blickrichtung? Bis vor kurzem waren die Hinweise in diese Richtung eher nicht-experimenteller Art. In Büchern zur Fahrerausbildung wird darauf hingewiesen, dass sowohl Motorradfahrer (Motorcycle Safety Foundation, 1992), wie auch Autofahrer (Bondurant & Blakemore, 1998) in die Richtung fahren, in die sie schauen. Im zweiten Beispiel wird sogar „look where you want to go“ als Regel zur Steuerung des Fahrzeugs empfohlen. In einem aktuellen Bericht der Forschungsgruppe TRAINER der Generaldirektion „Energie und Verkehr“ der Europäischen Kommission, wird von „... the tendency to steer in the looking direction“ berichtet, als eine derjenigen Situationen, für die die jungen Fahrer in der Fahrausbildung sensibilisiert werden müssen (<http://www.trainer.iao.fhg.de/achievements.htm>). Auf welche Quellen sich diese Aussagen jedoch stützen ist unbekannt. In der Vergangenheit gab es zwar einige wenige wissenschaftliche Berichte, die von einer systematischen Beeinflussung insbesondere bei entgegenkommendem Verkehr berichten (z.B. Helander, 1978), welche aber nicht einen direkten Bezug zur Blickrichtung des Fahrers herstellten.

Seit kurzer Zeit liegen jedoch auch experimentelle Untersuchungen vor. In einer Studie mussten Personen entlang eines Korridors laufen und eine exzentrische Position fixieren. Man fand dabei eine zwar kleine aber systematische Richtungsänderung der Laufrichtung in Richtung der Blickbewegung (Cutting, Readinger, & Wang, in Druck). In einer zweiten Arbeit wurde ebenfalls eine systematische Hinwendung zur Seite der Blickrichtung beobachtet, wenn Fahrer in einem Simulator eine Detektionsaufgabe lösen mussten, welche seitlich von der Bewegungsrichtung präsentiert wurde (Readinger, Chatziastros, Cunningham, Cutting, & Bülthoff, 2002). Eine dritte Studie, die Evidenz in die gleiche Richtung liefert, wird im letzten Kapitel vorgestellt (Kapitel 7).

Die Hypothese in diesem Experiment ist, dass durch die seitliche Schneefeldbewegung auch eine systematische Veränderung der Blickrichtung resultiert. Doch warum sollte sich die Blickrichtung verändern? Eine Möglichkeit wäre die zuvor beschriebene Tendenz in Richtung des Expansionsfokus zu blicken. Da der optische Fluss des Schneefeldes einen eigenen irrelevanten Expansionsfokus besitzt (iFOE), könnten die Fahrer geneigt sein ihren Blick gelegentlich dorthin zu bewegen. Ein zweiter Grund könnte in den reflexiven Augenbewegungen liegen, die bei einer großflächigen Bewegung auftreten, dem optokinetischen Nystagmus (OKN). Blickt ein Fahrer irgendwo auf die Fahrbahn und zeigt er einen OKN aufgrund der großflächigen Schneefeldbewegung, würde man erwarten, dass die langsame Phase des OKN in Richtung der Schneefeldbewegung geht, und die schnelle Phase in Gegenrichtung. Dabei ist es denkbar, dass die Amplituden beider Phasen nicht gleich groß sind, und wenn eine der Amplituden regelmäßig größer wäre, würde aufgrund dieser Drift eine mittlere Blickrichtung resultieren, die näher oder entfernter zum iFOE liegt. Vor allem eine mittlere Blickrichtung die näher zum iFOE liegt, würde ein Zusteuern, unter der Annahme einer unvollständigen Unterdrückung der Koordination von Auge und Hand, erklären können.

Methoden

Die Methoden sind vergleichbar mit dem Schneesturm-Experiment (siehe auch Kapitel 4). In diesem Experiment wurde zusätzlich die Kopforientierung im Raum und die Augenstellung der Versuchsperson relativ zum Kopf gemessen. Aus der Kopforientierung und der Augenstellung wurde die Blickrichtung im Raum berechnet. Details zur Messung der Augen- und Kopfstellung finden sich in Anhang 3.

Visuelle Stimuli

Die Szene wurde auf einer 3.5 m entfernten Leinwand dargestellt. Der sichtbare Bereich betrug hier 180° horizontal und 55° vertikal. Die Aktualisierungsrate des Bildes lag bei 36 Hz. Das Schneefeld bestand aus 5000 weißen Punkten, die zufällig in einem 600 x 800 x 100 m großen Volumen (Breite, Tiefe, Höhe) vor dem Fahrer positioniert wurden.

Versuchsbedingungen

Jede Fahrt dauerte 25 Sekunden. Fünf Sekunden nach Durchgangsbeginn wurden die Fahrer entweder auf der Straße versetzt (12 Durchgänge mit einer Versetzung von 0.45, 1.07 oder 2.17 m, zufällig nach links oder rechts von der vorherigen Position), oder es begann die seitliche Schneefeldbewegung (24 Durchgänge). In den letztgenannten Durchfahrten wurde

dabei die Fahrgeschwindigkeit (10 oder 20 m/s) und die Richtung des irrelevanten Expansionsfokus des Schneefeldes manipuliert (iFOE bei -30° bzw. 30° , entspricht einer Schneefeldbewegung nach rechts bzw. links). Pro Kombination von Fahrgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Schneefeldes gab es sechs Wiederholungen. Insgesamt beinhaltete das Experiment 36 Durchfahrten.

Die Perturbation, auf die die Fahrer reagieren sollten (Versetzung) und diejenige, die keine Reaktion erforderte (Schneefeld), erfolgten kurz nach dem Beginn jedes Durchgang zu einem definierten Zeitpunkt (5 s). Dadurch war es möglich den Beobachtungszeitraum nach der Perturbation auf 20 s auszuweiten, und den Verlauf auch nach der anfänglichen Korrektur in Gegenrichtung zur Schneefeldbewegung zu betrachten. Die Bedingungen mit der lateralen Versetzung auf der Straße, waren einzig dazu gedacht eine Reaktionsbereitschaft der Teilnehmer aufrecht zu erhalten und eine Gewöhnung an die folgenlose Schneefeldperturbation zu vermeiden. Die Fahrten mit einer lateralen Versetzung wurden in der Analyse nicht berücksichtigt.

Teilnehmer

Es wurden 10 Teilnehmer im Alter von 17 bis 29 Jahren untersucht (Mittelwert 23.0 Jahre). Eine Person gab an keine Führerschein zu haben, und vier weitere Personen gaben an, nicht mehrmals wöchentlich ein Fahrzeug zu benutzen. Bei einer Versuchsperson konnte die Kalibrierung des Augennessgeräts trotz wiederholter Versuche nicht mit einer zuverlässigen Genauigkeit durchgeführt werden. Diese Versuchsperson absolvierte die anschließenden Fahrten, ihre Daten wurden aber nicht in die Analyse einbezogen.

Auswertung

Zur Analyse wurden nur die Bedingungen mit der lateralen Schneefeldbewegung herangezogen. Als abhängige Variablen wurden die laterale Position auf der Straße, die Augenstellung, die Kopforientierung und der Lenkradwinkel 72 mal in der Sekunde aufgezeichnet. Ein systematischer Effekt der experimentellen Faktoren auf jede der abhängigen Variable wurde einzeln durch eine Varianzanalyse bestimmt. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen abhängigen Variablen wurde durch das Verfahren der Kreuzkorrelation ermittelt. Dieses Verfahren bietet sich hier besonders an, da man erwarten kann, dass die experimentelle Variation auf manche Größen früher einen Einfluss hat, als auf andere, so dass zwischen zwei Größen ein starker Zusammenhang besteht, jedoch nur wenn man eine „Latenz“ einberechnet.

Für die Kreuzkorrelation wurden jeweils entweder die ersten zehn Sekunden nach Einsetzen der Schneefeldbewegung herangezogen, oder,

wenn der Zusammenhang in einer späten Phase des Durchgangs bestimmt werden sollte, das Intervall der letzten zehn Sekunden jedes Durchgangs. Die Kreuzkorrelation zwischen zwei Zeitreihen wurde innerhalb der Zeitabstände (Lags) -4 s bis +4 s berechnet. Zeigt sich eine Korrelation einer Variablen X mit einer Variablen Y mit einem negativen Lag, dann bedeutet das, dass die Variable X führt, d.h. ein früherer Wert von X hat einen Zusammenhang mit einem zeitlich späteren Wert von Y.

Wenn im Ergebnissteil die Blickrichtung berichtet wird, dann ist diese auf ein raumzentriertes Koordinatensystem bezogen. Eine Blickrichtung von vertikal und horizontal Null Grad zeigt dabei auf die horizontale Mitte der Leinwand auf einer Höhe von 1.25 m. Dies entspricht einem sitzenden Beobachter dessen Blick auf den Horizont gerichtet ist. Die Kopfrichtung bezieht sich auf das gleiche Koordinatensystem.

Ergebnisse

Die Positionsänderung nach Einsetzen der Schneefeldbewegung ist in Abbildung 6.1.d zu sehen. Konsistent mit früheren Ergebnissen fuhren die Teilnehmer in Richtung des Expansionsfokus des Schneefeldes (iFOE), d.h. sie korrigierten in Gegenrichtung zur Schneefeldbewegung. Eine Varianzanalyse der lateralen Positionsänderung zwischen dem Einsetzen der Schneefeldbewegung und der Position nach 5 s zeigte einen signifikanten Effekt der Richtung des iFOE, $F(1,8) = 25.56$, $p < 0.001$, der Vorwärtsgeschwindigkeit, $F(1,8) = 10.59$, $p = 0.012$, und eine Interaktion zwischen Richtung des iFOE und der Vorwärtsgeschwindigkeit, $F(1,8) = 10.45$, $p = 0.012$. Bei einem linksseitigen iFOE wurde eine laterale Änderung der Position von 0.285 m beobachtet, und bei einem rechtsseitigen von 0.088 m. Wie man den gemittelten Fahrspuren in Abbildung 6.1. entnehmen kann, konnte man beim Einsetzen der Schneefeldbewegung eine Bewegung nach links beobachten. Eine generelle Tendenz der Fahrer sich links von der Straßenmitte zu positionieren wurde auch in anderen Experimenten beobachtet. Die hier beobachtete seitliche Bewegung hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass die Fahrer ihre anvisierte Mitte noch nicht eingenommen hatten. Die Asymmetrie im Betrag der Positionsänderung (0.285 m vs. 0.088 m) und des Effekts der Vorwärtsgeschwindigkeit kann durch diese noch andauernde Bewegung zur Seite zu einem großen Teil erklärt werden.

Die beobachtete Positionsänderung wurde herbeigeführt durch einen vorausgehenden Lenkwinkelschlag. Eine Varianzanalyse des mittleren Lenkwinkels im Zeitbereich 1-2 s nach der Schneefeldbewegung bestätigte den Effekt der Richtung des iFOE, $F(1,8) = 19.73$, $p = 0.002$. In Abbildung 6.1.c zeigt sich ca. 5 s nach dem Einsetzen der Schneefeldbewegung eine weitere Trennung der Lenkradwinkeldaten in Abhängigkeit von der iFOE-Rich-

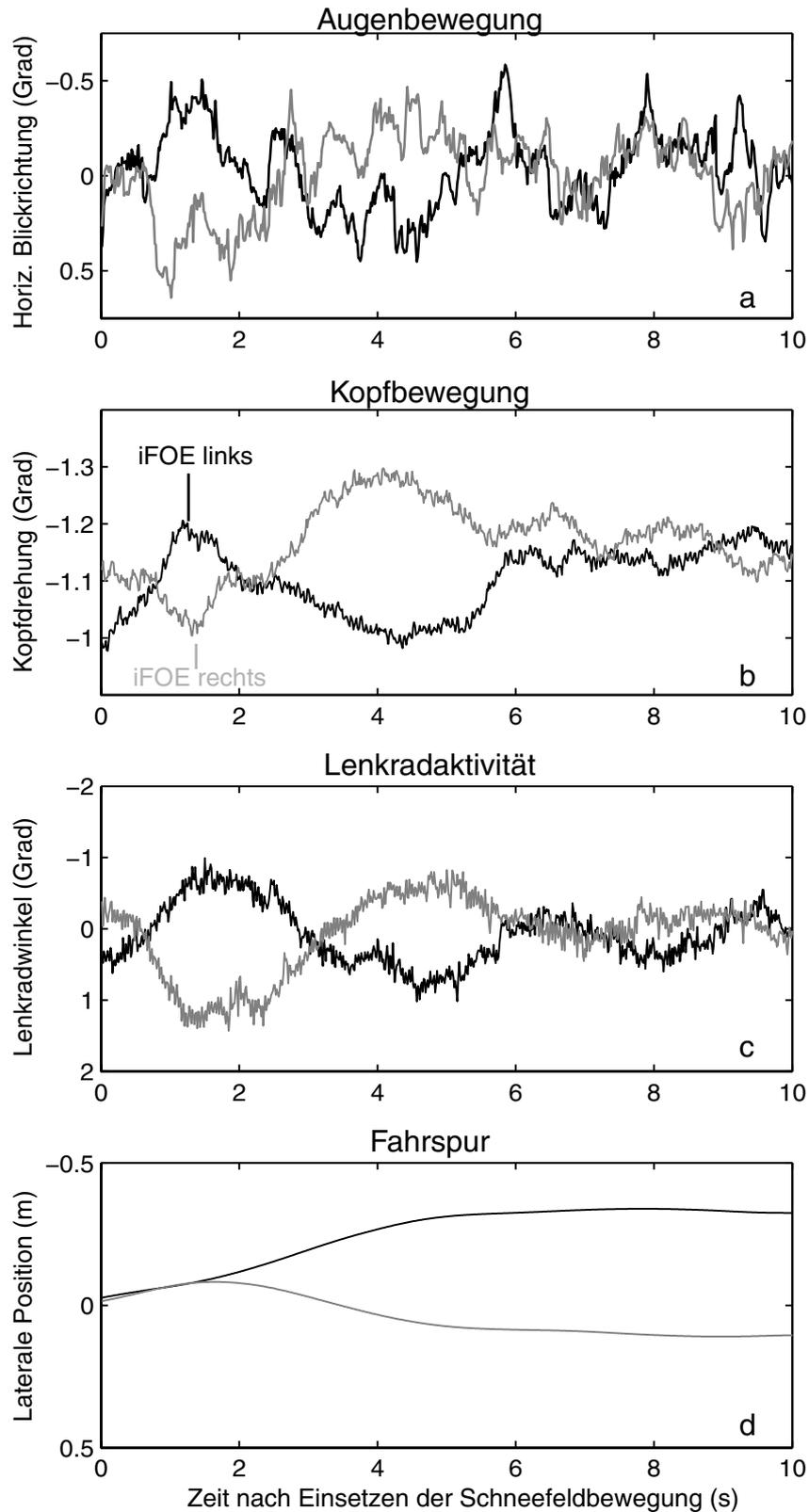


Abbildung 6.1. Augen-, Kopf- und Lenkradbewegung, sowie laterale Position in der Übersicht. Nach Einsetzen der seitlichen Schneefeldbewegung beobachtet man eine dazu korrespondierende horizontale Augenbewegung (nach ca. 680 ms), Kopfdrehung (810 ms) und Lenkradbewegung (700 ms) in die gleiche Richtung. Die schwarzen (grauen) Linien beziehen sich auf ein Schneefeld mit einem linksseitigen (rechtsseitigen) iFOE, d.h. mit einer Bewegung von links nach rechts (rechts nach links). N = 9.

tung. Vergleicht man jedoch den mittleren Lenkwinkel im Zeitbereich 4-5 s nach der Perturbation, stellt sich dieser Unterschied nicht als signifikant heraus ($p > 0.05$).

Bei der Betrachtung der zeitlichen Verläufe der gemittelten Augen- und Kopfbewegungen mit dem Verlauf des Lenkradwinkels während der ersten sechs Sekunden, fällt eine gewisse Übereinstimmung auf: Ungefähr zu den gleichen Zeitpunkten, in denen sich ein Unterschied im Verlauf des Lenkradwinkels in Abhängigkeit von der Seite des iFOE zeigt, trennen sich auch die Verläufe der Richtung der Augen- und Kopforientierung (vergleiche Abbildung 6.1.a-c). Analysiert man die Augenpositions- und Kopfdaten varianzanalytisch in Zeitintervall 1-2 s und 4-5 s nach dem Einsetzen der Schneefeldbewegung, zeigt sich kein experimenteller Faktor signifikant (alle $p > 0.05$).

Aufschlussreicher sind dagegen die Zusammenhänge zwischen den erhobenen Messwerten, wie sie die Kreuzkorrelationen liefern. In Tabelle 5 sind die Korrelationen zwischen Blickrichtung, Kopfrichtung und Lenkradbewegung während des ersten 10-Sekunden-Intervalls in einer Matrix dargestellt. Diese Werte stellen Mittelwerte der Korrelationen individueller Durchgänge dar. Dazu wurde zwischen zwei Messreihen eines Durchgangs die jeweils extremste Korrelation und der dazugehörige Zeitabstand (Lag) bestimmt und über die Durchgänge gemittelt. Die Ergebnisse der Kreuzkorrelationen zeigten, dass sowohl die Blickbewegungen wie auch die Kopfdrehungen der Lenkradbewegung zeitlich vorausliefen. Diese frühere Initiierung erfolgte einige hundert Millisekunden vor der Lenkradreaktion in die gleiche Richtung. Auf individueller Ebene scheint dabei die Blickrichtungs- und Kopfrichtungsänderung im Durchschnitt gleichzeitig stattgefunden zu haben. Dabei zeigte sich ein größerer Zusammenhang zwischen Kopf- und Lenkradstellung, als zwischen Blickrichtung und Lenkradstellung, so dass die Kopfstellung ein besserer Prädiktor für die Lenkradbewegungen zu sein scheint.

Eine weitere Möglichkeit die Blickrichtungs-, Kopfrichtungs- und Lenkradbewegungsdaten auf ihren Zusammenhang zu prüfen, war eine Kreuzkorrelation auf die gemittelten Werte, welche auch in Abbildung 6.1. dargestellt sind. Die Matrix dieser Kreuzkorrelationen kann Tabelle 6 entnommen werden. Es zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen Blickrichtung und Lenkradbewegung, sowie auch zwischen Kopfrichtung und Lenkradbewegung. Wie bei den Kreuzkorrelationen innerhalb individuellen Durchgängen, wurde festgestellt, dass die Blick- und Kopfbewegung vor der Lenkradbewegung stattfand. Ein Unterschied bestand darin, dass die Kopfdrehung nach der Augenbewegung auftrat. Die hohen Korrelationen bedeuten, dass in der ersten 10-Sekunden-Phase nach der Schneefeldperturbation

Kreuzkorrelation (Spalte m. Zeile)	Auge	Kopf	Lenkrad
Auge	(1) (0)	$r = 0.47$ lag = -2 ms	$r = 0.40$ lag = -358 ms
Kopf		(1) (0)	$r = 0.56$ lag = -297 ms
Lenkrad			(1) (0)

Tabelle 5 Durchschnittliche Kreuzkorrelation (r) der individuelle Durchgänge im Zeitbereich 0-10 s nach Einsetzen der Schneefeldbewegung. Der durchschnittliche Zeitabstand (Lag) ist in Millisekunden dargestellt, wobei die Spaltenvariablen bei einem negativen Lag führen. Die Korrelationen stellen Mittelwerte über alle Durchgänge dar, die mittels einer Fishers-Z-Transformation ermittelt wurden. Der kritische Wert, dass sich eine Korrelation mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% (zweiseitig) von einer Korrelation $r = 0$ unterscheidet, ist $r = 0.096$ ($n = 720$).

	Auge	Kopf	Lenkrad
Auge	(1) (0)	$r = 0.66$ lag = -139 ms	$r = 0.66$ lag = -500 ms
Kopf		(1) (0)	$r = 0.74$ lag = -222 ms
Lenkrad			(1) (0)

Tabelle 6 Kreuzkorrelation und dazugehöriger Lag der gemittelten Augen-, Kopf- und Lenkraddaten im Zeitbereich 0-10 s nach Einsetzen der Schneefeldbewegung. Der kritische Wert für eine signifikante Korrelation ist $r = 0.096$ bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% und zweiseitigem Test.

das Steuerungsverhalten der Fahrer über die Augenbewegung zu 43% und über die Kopfbewegung zu 54% vorausgesagt werden kann.

Sieben bis acht Sekunden nach Einsetzen der Schneefeldbewegung war keine weitere Zunahme der lateralen Abweichung von der Straßenmitte zu beobachten. Die Frage, die sich hier stellt, ist ob sich in dieser Phase auch der Zusammenhang zwischen den abhängigen Variablen änderte. Die Kreuzkorrelationen der gemittelten Messwerte im Zeitbereich 10-20 s nach Perturbationsbeginn zeigten einen insgesamt niedrigeren Zusammenhang zwischen den Variablen, als in der ersten Hälfte der Durchgänge (Tabelle 7). Die stärkste Korrelation bestand hier zwischen der Blickrichtung und der Richtung der Lenkradbewegung, wobei die zeitliche Nähe dieses Zusammenhangs hier deutlich abgeschwächt wurde - das Auge führte die Lenkradbewegung mit einem großen Lag von weit über einer Sekunde. Ein qualitativer Unterschied zeigte sich in den Korrelationen mit der Kopfbewegung. Nun lag die Kopfbewegung zeitlich nicht mehr zwischen den Augenbewegungen und der Lenkradbewegung, sondern sie folgte der

	Auge	Kopf	Lenkrad
Auge	(1) (0)	$r = 0.23$ lag = -1306 ms	$r = 0.36$ lag = -1250 ms
Kopf		(1) (0)	$r = 0.29$ lag = 125 ms
Lenkrad			(1) (0)

Tabelle 7 Kreuzkorrelation (r) und dazugehöriger Lag der gemittelten Werte im Zeitbereich 10-20 s nach Einsetzen der Schneefeldbewegung. Der kritische Wert für eine signifikante Korrelation ist $r = 0.096$ bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% und zweiseitigem Test

Lenkradbewegung nach ca. 100 ms. Entsprechend lang war die Latenz mit der die Kopfbewegung der Augenbewegung in die gleiche Richtung folgte.

Dieses Teilergebnis kann dann folgendermaßen zusammengefasst werden: Nachdem die Fahrer auf die seitliche Schneefeldbewegung reagiert hatten, führten Blickrichtungsänderungen mit einer Latenz von ca. einer Sekunde zu Lenkraddrehungen in die gleiche Richtung. Dieser Zusammenhang war dabei nicht sehr stark - die Blickbewegungsvariabilität erklärt nur ca. 13% der Varianz der Lenkradbewegung. Kurz nachdem die Lenkradbewegung durchgeführt worden war, folgte auch eine Kopfdrehung in die gleiche Richtung. Dieser Zusammenhang ist dabei noch etwas geringer, so dass weniger als 10% der Varianz durch die Korrelation von Kopf- und Lenkraddrehung erklärt werden.

Zusammenfassung und Diskussion

In dieser Studie wurde das Ergebnis repliziert, dass Fahrer bei einer lateralen Bewegung eines Schneefelds ihre Position in Richtung des irrelevanten Expansionsfokus dieses Schneefelds (iFOE) korrigieren. Es wurde festgestellt, dass kurz nach Einsetzen der Schneefeldbewegung (ca. 680 ms) eine erste Blickrichtungsänderung in Richtung des iFOE stattfindet, und die Kopfrichtung und Lenkraddrehung dieser zeitlich nachfolgen.

Es lies sich feststellen, dass im ersten 10-Sekunden-Intervall, in welchem auch die laterale Korrektur erfolgt, eine hohe Koordination von Blickrichtung und Lenkbewegung vorliegt, bei der die Blickrichtung 350-500 ms früher als die Lenkbewegung auftritt. Ferner geht die Änderung der Blickrichtung auch mit systematischen Kopfdrehungen einher. Je nach Korrelationsberechnung, ob über die individuellen Zeitreihen oder aufgrund der über die Durchgänge gemittelten Daten, finden Blick- und Kopfbewegungen gleichzeitig statt bzw. die Kopfbewegung folgt mit einer Latenz von ca. 140 ms. In diesem ersten 10-Sekunden-Intervall übertrifft ferner der Zusammenhang von Kopf- und Lenkbewegung den Zusammenhang von

Blickrichtung und Lenkbewegung. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass das okkulare System eine kleinere Trägheit überwinden muss, bzw. der Kopf aufgrund seiner Ausdehnung und Viskosität eine stärkere Beschleunigung benötigt (Zangemeister, Jones, & Stark, 1981), die mehr der Dynamik der Lenkradbewegung gleicht.

Im zweiten 10-Sekunden-Intervall dagegen, wenn sich im Mittel über die Versuchspersonen keine lateralen Korrekturen mehr nachweisen lassen, findet man eine niedrigere Koordination von Blickrichtung und Lenkbewegung. Dabei vergrößert sich der Zeitabstand der maximalen Korrelation um ein Vielfaches auf über eine Sekunde. Ebenso wird auch der starke Zusammenhang zwischen Blickrichtung und Kopfbewegung stark erniedrigt, so dass nunmehr auch die Kopfbewegung viel später die Blickbewegung begleitet. Es zeigt sich dabei, dass zuerst die Lenkreaktion stattfindet und erst dann eine Kopfbewegung in die gleiche Richtung vorkommt.

Die Ergebnisse dieser Studie sind konsistent mit den Befunden, die eine hohe Koordination zwischen Augen-, Kopf- und Handbewegungen bzw. Richtung der Lokomotion zeigen. Die Richtung und der zeitliche Zusammenhang zwischen Blickrichtung und Lenkreaktion sind mit der Vorstellung verträglich, dass die Lenkreaktion aufgrund der seitlichen Schneefeldbewegung durch eine Veränderung der Blickrichtung vermittelt wird. Speziell in Bezug auf die Arbeiten zur Koordination von Blickrichtung und Lenkbewegung während der Kurvenfahrt (Land & Furneaux, 1997; Land & Lee, 1994) sind diese Ergebnisse interessant, und nach Kenntnis des Autors ist dies erst die zweite Studie, die einen solchen Zusammenhang im Fahrbereich aufzeigt. Es ergaben sich allerdings einige Unterschiede zwischen den Resultaten beider Studien, die diskutiert werden müssen.

Korrelationshöhe und zeitlicher Zusammenhang

Bei den Untersuchungen zum Kurvenfahren zeigte sich eine höhere Korrelation als bei der hier vorgestellten Studie (ca. 0.9 versus 0.66). Diese höhere Korrelation kann dadurch erklärt werden, dass bei den Kurvenfahrten von Land et al. (1994) größere Blickrichtungsänderung und Lenkreaktionen nötig waren, als bei einer Fahrt auf einer geraden Straße. Zudem zwingt eine Kurvenfahrt Reaktionen zu definierten Zeitpunkten auf, die wenig individuellen Spielraum lassen. Anders bei einer geraden Fahrt, die nicht vorschreibt, wann der Fahrer eine Abweichung von der Mitte korrigieren muss. So entstehen zwischen den Probanden, aber auch innerhalb der Fahrten einer Versuchsperson, zwangsläufig Unterschiede bezüglich des Zeitpunktes einer Korrektur, die sich in einer geringeren Korrelation niederschlagen können.

Die Stärke der Kopplung zwischen Blickrichtung und Lenkreaktion in Abhängigkeit von der Amplitude und dem Timing der erforderlichen Lenkreaktionen, zeigt sich auch im Vergleich zu den Korrelationen aus dem zweiten 10-Sekunden-Intervall (10-20 s nach Durchgangsbeginn). Die niedrigeren Korrelation lassen sich dadurch erklären, dass, anders als im ersten 10-Sekunden-Intervall mit dem Einsetzen der Schneefeldbewegung, kein externes Ereignis die Lenkreaktionen „triggerte“. Der verlängerte zeitliche Zusammenhang (höherer positiver Lag) lässt zudem vermuten, dass die zeitliche Kopplung zwischen Blickrichtung und Lenkreaktion nicht fix ist, sondern vom Fahrer beeinflusst werden kann.

Unterdrückung der Koordination und Buffer

Die Ergebnisse zeigen, dass die Koordination von Blick- und Lenkrichtung unter diesen Bedingungen nicht vollständig unterdrückt worden ist. Anders als die Befunde, die keine Lenkreaktionen finden, wenn nicht auf die Straßenbegrenzung fixiert wird, findet man hier eine systematische Lenkreaktion zur Seite der Blickrichtung.

Die Lenkreaktion folgte der Blickrichtung innerhalb 350-500 ms, einer Zeitdauer, die kürzer ist als die von Land et al. (1997) beschriebenen 0.8 s. Die erste Schlussfolgerung ist, dass die Latenz der Kopplung zwischen Blick und Lenkreaktion deutlich verkürzt werden kann. Die zweite Schlussfolgerung ist, dass dieser kürzere Lag nicht unbedingt den Ergebnissen von Land und seinen Kollegen widerspricht. Man kann gemäß dem Konzept eines Buffers für die Blickrichtung vielmehr argumentieren, dass genau diese kurze Latenz anzeigt, dass die Fahrer gar nicht oder nur kurz die Information im Zwischenspeicher gelassen haben: Das ist gleichbedeutend damit, dass die Fahrer nicht die Zeit hatten (oder sich nicht die Zeit genommen haben), die Information in irgendeiner Weise zu bewerten. Denn es wird angenommen dass die Zeit zwischen einer einfachen Reaktion (0.3-0.4 s) und der Lenkreaktion (ca. 0.8 s) für die Bewertung der Blickrichtungsinformation erforderlich ist. Die hier ermittelten Zeitabstände liegen dagegen vielmehr in der Größenordnung einer einfachen Reaktion.

Der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass die gemessenen Blickwinkelabweichung im Mittel sich selten von der Straße lösen: Der Winkel zwischen der Mitte der Straße und der mittleren horizontalen Blickrichtung liegt bei ca. 0.75° . Die vertikale Blickrichtung der Fahrer liegt im Durchschnitt bei ca. 1.0° unter dem Horizont, einer Stelle, an der die Straße eine horizontale Ausdehnung von 2.9° hat. Somit liegt die Blickwinkelabweichung innerhalb den Seitenbegrenzungen - ein Umstand, warum die Fahrer vielleicht ihre Blickabwendung nicht als solche wahrgenommen haben könnten.

Zusammenhang von Kopf- und Augenbewegungen.

Die hohe Korrelation und der enge zeitliche Zusammenhang zwischen Blickrichtung und Kopfstellung stimmen mit der Vorstellung überein, dass beide Bewegungen gleichzeitig initiiert werden (Hollands et al., 2002; Land, 1992). Die Bewegung des Kopfs und der Augen können vor allem dann gut vorausgesagt werden, wenn die Blickrichtungsänderung schnell gemacht werden muss (Land, 1992). Demnach kann ein Grund für die niedrigere Voraussagbarkeit der Kopfbewegung in der zweiten 10-Sekunden-Phase der Durchgänge darin liegen, dass hier die Probanden tatsächlich nicht schnell reagieren mussten.

Beziehung zur induzierten Bewegung

In einem vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass die Befunde der lateralen Korrektur bei seitlichem Schneefall gut mit der Vorstellung einer induzierten Bewegung der Straße übereinstimmen. Wie verhalten sich die Resultate dieses Experimentes zur Hypothese der induzierten Bewegung? Der große Unterschied liegt in der Rolle der Augenbewegungen. Direkte Messungen der Augenbewegung konnten keinen Beitrag von Augenbewegung zur induzierten Bewegung feststellen (siehe Reinhardt-Rutland, 1988). Zwar induziert eine Hintergrundbewegung eine phänomenale Bewegung eines fixierten Zielreizes, sie hat jedoch keinen Effekt auf die Blickrichtung. Allerdings beobachtet man einen Effekt auf die Kopfstellung, welche in Richtung der illusorischen Bewegung stark beeinflusst wird (Zivotofsky et al., 1995).

Folgt die Lenkbewegung der scheinbaren Bewegung der Straße oder der veränderten Blickrichtung? Und welche zeitliche oder kausale Beziehung kann man zwischen induzierter Bewegung und Blickrichtungsänderung annehmen? Diese Fragen sind aus den vorliegenden Resultaten schwierig zu beantworten. Man kann jedoch versuchen für oder gegen die möglichen Alternativen (siehe auch Abbildung 6.2.) aus dem gegebenen Datenmaterial und Ergebnissen anderer Studien Argumente zu sammeln. In allen Versionen in Abbildung 6.2. ist die Lenkreaktion der Blickrichtungsänderung nachgestellt, wie es die Ergebnisse dieses Experiments nahe legen. Eine lineare Abfolge scheidet aus (Abbildung 6.2. a und b), da weder eine Blickrichtungsänderung notwendigerweise zu einer induzierten Bewegung führt, noch eine induzierte Bewegung zwangsweise zu einer Blickrichtungsänderung. In den weiteren Varianten in Abbildung 6.2. wird deshalb davon ausgegangen, dass die seitliche Flussbewegung beides auslöst.

Eine Frage ist nun, ob induzierte Bewegung und Blickrichtungsänderung gleichzeitig (c-e) oder abwechselnd ausgelöst werden (f-h), und ob die Lenkreaktion einem der beiden Effekten folgt (c, d, f, g), oder beiden (e, h).

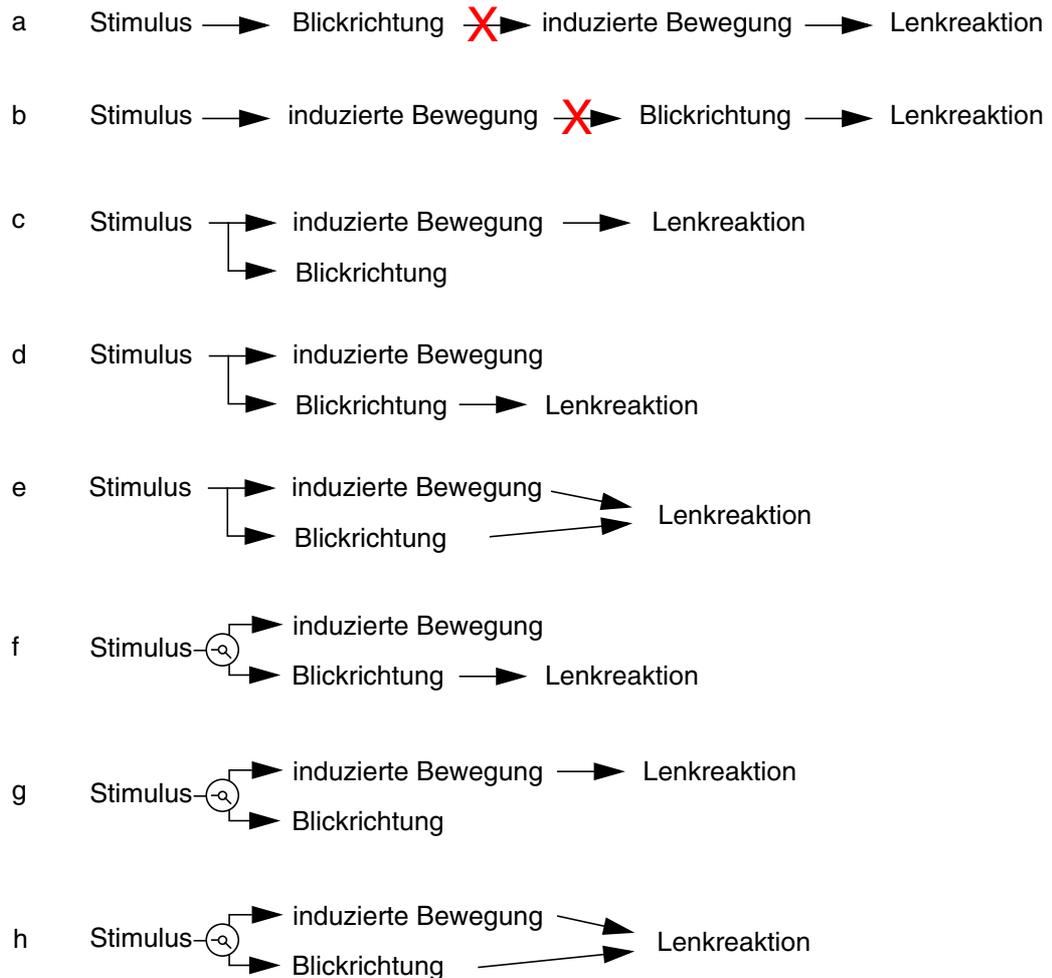


Abbildung 6.2. Mögliche Sequenzen des Ablaufs von induzierter Bewegung, Blickrichtungsänderung und Lenkreaktion. Der Stimulus in diesen Varianten ist die laterale Schneefeldbewegung. In den Varianten f bis h symbolisiert der Schalter, dass der Stimulus alternierend entweder induzierte Bewegung oder Blickrichtungsänderungen auslöst.

Dass eine Lenkreaktion der Blickrichtung folgen kann, ist bereits gezeigt worden und unstrittig (Land & Furneaux, 1997; Land & Lee, 1994). Kann jedoch die motorische Handlung der Lenkreaktion von der induzierten Bewegung beeinflusst worden sein? Seitdem die Hypothese der getrennten visuellen Verarbeitungswege für die Wahrnehmung und die motorische Handlung postuliert worden ist (Goodale & Milner, 1992), entstanden eine Vielzahl an Studien, die eine mögliche Immunität der motorischen Handlung gegenüber visuellen Illusionen untersucht haben (z.B. Aglioti, DeSouza, & Goodale, 1995; Franz, Fahle, Bühlhoff, & Gegenfurtner, 2001; Franz, Gegenfurtner, Bühlhoff, & Fahle, 2000; Glover & Dixon, 2001; Westwood, Chapan, & Roy, 2000). Die Beeinflussung der motorischen Handlung speziell durch induzierte Bewegung wurde mit einer Aufgabe untersucht,

bei denen die Probanden ein bewegendes Ziel (eine virtuelle Spinne) treffen mussten, während der Hintergrund verschoben wurde. Man fand dabei keine Beeinflussung der Trajektorie oder der Schlagposition aufgrund einer erhöhten scheinbaren Geschwindigkeit und folgerte, dass keine Trennung zwischen Wahrnehmung und Handlung vorliegt, und dass die Schlagbewegung die Positionsinformation nutzt und nicht die Geschwindigkeit des Zielobjekts (Brouwer, Brenner, & Smeets, 2002; Smeets & Brenner, 1995). Sollte man deshalb folgern, dass induzierte Bewegung keinen Effekt auf die motorische Ausführung hat? Nein, denn zum Einen ist es möglich, dass bei einer Fahraufgabe die (scheinbare) Geschwindigkeit eines vorausliegenden Punktes und nicht nur seine Position relevant ist. Zum Anderen existiert auch eine alternative Konzeption zur Dissoziation von Wahrnehmung und Handlung, nach der eine *Dissoziation von Planung und Kontrolle* vorgeschlagen wird (Glover & Dixon, 2001). Nach dieser Vorstellung wird ein früher Planungsprozess durch den Kontext beeinflusst und ist somit anfällig für Illusionen. Der spätere Kontrollprozess dagegen soll unabhängig vom Kontext und kaum durch Illusionen zu beeinflussen sein. Nach den Autoren findet dieses Modell Unterstützung in Befunden, die zeigen, dass Illusionen einen größeren Effekt auf Handlungen haben, wenn sie nach einer Zeitverzögerung ausgeführt werden oder wenn keine visuelle Rückmeldung zur Verfügung steht (Westwood et al., 2000). In den Experimenten von Smeets und Brouwer, war die Zeitdauer der Schlaghandlung relativ kurz (ca. 300 ms), entsprechend kurz fällt die Planungsphase aus. Beim Fahren allerdings wird Information über den Straßenverlauf einige Sekunden vor der Lenkausführung aufgenommen, aufgrund derer die später notwendige Reaktion antizipiert und vorbereitet wird. Wegen dieser längeren Planungsphase ist es denkbar, dass Effekte einer induzierte Bewegung eher bei einer Lenkbewegung auftauchen, als bei einer schnellen manuellen Bewegung.

Diese Frage, ob induzierte Bewegung allein schon eine Lenkreaktion verursacht, könnte man einfach überprüfen, indem man Fahrer instruiert den Fluchtpunkt der Straße zu fixieren und ermittelt, ob dann immer noch eine laterale Korrektur zu beobachten ist. Bis dahin kann man eine mögliche Lenkreaktion aufgrund einer induzierten Bewegung nicht ausschließen.

Auch wenn Augenbewegungen induzierte Bewegung nicht auslösen, so kann induzierte Bewegung auch während langsamen Augenfolgebewegungen wahrgenommen werden. Die scheinbare Bewegungsrichtung eines stationären Zielreizes wird dann entgegen der Bewegungsrichtung des räumlich nächsten induzierenden Stimulus gesehen (Schulman, 1979). Die hier vorgestellten Resultate liefern jedoch auch Hinweise, dass ein Einfluss der induzierten Bewegung nicht immer mit begleitenden Augenbewegungen zu sehen war. Die mittlere Kreuzkorrelation zwischen Blickrichtung und Kopf-

bewegung in einzelnen Durchgängen lag bei -2 ms, d.h. Reaktionen von Auge und Kopf erfolgten im Mittel faktisch gleichzeitig. Dieser Wert bedeutet aber auch, dass innerhalb individuellen Durchfahrten es notwendigerweise vorkommen musste, dass die Kopfbewegungen manchmal vor den Augenbewegungen erfolgten. Dies würde damit übereinstimmen, dass die induzierte Bewegung die Kopfstellung beeinflusst hat ohne dass Blickrichtungsänderungen auftraten (Zivotofsky et al., 1995). Die vorliegenden Resultate lassen nicht entscheiden, wie häufig Blickrichtungsänderungen zusammen mit der Wahrnehmung von induzierten Bewegung auftreten. Sollte es sich jedoch zeigen, dass bereits induzierte Bewegung für sich allein eine Lenkreaktion auslöst, wäre diese Frage allerdings auch von nachrangiger Bedeutung.

Was bewirkt der Einsatz von Fixationen?

Der folgende kurze Abschnitt steht nicht im direkten Zusammenhang mit den vorhergehenden Experimenten und kann deshalb übersprungen werden. Für den interessierten Leser stellt dieser Abschnitt drei weitere Strategien zur Kontrolle der Bewegungsrichtung vor, die stark von einem gezielten Einsatz von Augenbewegungen profitieren können.

Wie in der Einleitung ausgeführt, beobachtet man häufig Augenbewegungen in Richtung des Expansionsfokus, eine Tendenz, die für die genauere Wahrnehmung der Headingrichtung vorteilhaft sein kann. Die Verarbeitungszeit für die Headingschätzung wurde auf 430 ms geschätzt (Hooge, Beintema, & van den Berg, 1999). In diesem Experiment wurde ermittelt, dass die ersten Augenbewegungen entgegen der Bewegungsrichtung des Schneefeldes im Durchschnitt ca. 680 ms nach dem Einsetzen dieser Bewegung eintreten. Diese Zeiten sind mit der Annahme konsistent, dass die Augenbewegungen erst dann stattfinden, wenn aufgrund der Verarbeitung des optischen Flusses Anlass besteht, dass die Headingrichtung oder der Expansionsfokus ihre Lage geändert haben.

Es gibt allerdings auch weitere Vorschläge, wie Augenbewegungen koordiniert eingesetzt werden können, um die Bewegungsrichtung zu kontrollieren. Es wurde vorgeschlagen, dass nicht die absolute Headingrichtung für die Kontrolle der Bewegung wichtig ist, sondern eher die relative Headingrichtung bezüglich eines nahen Objektes, welches vielleicht ein Hindernis darstellen könnte. Um diese Aufgabe zu lösen, wurde in mehreren Arbeiten von Cutting und seinen Kollegen vorgeschlagen, die Bewegungsparallaxe zweier stationärer Objekte in unterschiedlicher Tiefe zu verwenden (Cutting, Wang, Flückinger, & Baumberger, 1999; Cutting et al., 1992; Cutting, Vishton, Flückinger, & Baumberger, 1997). Dieser Ansatz unterscheidet sich insofern von anderen Vorschlägen, da sie der Vorstellung

widersprechen, dass Bewegungsinformation über einen großen Bereich des visuellen Feldes integriert werden muss (z.B. Warren & Saunders, 1995). Sie gehen dagegen davon aus, dass lokale Information ausreicht. Dabei kann der gezielte Einsatz von Fixationen die relative Headingbestimmung erleichtern. Fixiert ein Beobachter ein nahes Objekt (Referenzobjekt) während seiner Vorwärtsbewegung, dann vollzieht ein zweites Objekt (Vergleichsobjekt) eine Relativbewegung zum Referenzobjekt. Es existieren unterschiedliche Klassen von Relativbewegungen: Die Objekte können konvergieren, beschleunigt divergieren oder abbremsend divergieren. Nach Cutting zeigen dann Objekte, die zueinander konvergieren oder abbremsend divergieren, an, dass die gegenwärtige Bewegung vorbei am Referenzobjekt stattfinden wird, und zwar entgegen der Seite des Vergleichsobjekts (Cutting, Alliprandini, & Wang, 2000). Beschleunigt divergierende Objekte dagegen weisen keine eindeutige Korrelation mit der Bewegungsrichtung auf. Cutting und seine Kollegen zeigten ferner, dass die Headingschätzungen dann korrekt ausfallen, wenn entweder konvergierende oder abgebremsend divergierende Objekte fixiert werden.

Nach einem Argument von Hollands et al. (2002), können Fixationen, die auf einer Stelle des zukünftigen Weges gerichtet sind, das Problem der Dekomposition des retinalen Flussfeldes in einen translatorischen und einen rotatorischen Anteil umgehen (Hollands et al., 2002). Bei der Fixation einer solchen Stelle während der Vorwärtsbewegung entsteht kein rotatorischer Fluss um die Hochachse, da es keine horizontale Augenbewegungen gibt. Allerdings gibt es rotatorischen Fluss um die Querachse, da man sich dem fixierten Objekt nähert. Darauf hin wandert der retinale FOE vertikal nach unten. Die horizontale Exzentrizität des retinalen FOE bleibt dagegen unverändert, und man könnte eine Strategie anwenden, nach der die Laufrichtung zum FOE solange verändert wird bis eine vollständige (horizontale) Ausrichtung erreicht ist. Es ist hier anzumerken, dass diese Strategie ebenfalls kein ausgedehntes optisches Flussfeld benötigt. Eine Ausrichtung zu einem fixierten Punkt auf dem gewünschten Weg ist vielmehr mit der Strategie der egozentrischen Lokalisation äquivalent, deren einzige Größe die Richtung des Ziels in egozentrische Koordinaten ist (Rushton et al., 1998). Der Vorteil ein Ziel dabei zu fixieren könnte darin liegen, dass die Richtung des anzusteuernden Ziels über extra-retinale Information der Augenstellung genauer bestimmt werden könnte.

Kim und Turvey (1999) lieferten die vielleicht eleganteste und vielversprechendste Erklärung, warum es sinnvoll sein könnte, eine Stelle auf dem gewünschten Pfad zu fixieren (Kim & Turvey, 1999). Ein in wesentlichen Punkten gleicher Ansatz wurde etwas später auch von Wann und Kollegen einem breiteren Publikum präsentiert (Wann & Land, 2000; Wann & Swapp, 2000), ohne Kenntnis des Originalartikels von Kim und Turvey (Wann &

Land, 2001). In diesen Arbeiten wurde theoretisch gezeigt, dass wenn während einer Kurvenfahrt eine Stelle auf der *zukünftigen* Bahn fixiert wird, alle Flusstrajektorien der Bodenelemente in der Bildebene linear verlaufen. Das heißt, dass gerade Linien anzeigen, ob die Fixation auf einer Stelle in der Umwelt liegt, die bei Beibehaltung der gegenwärtigen Kurvenfahrt irgendwann passiert wird. Fixiert man einen Punkt außerhalb der zukünftigen Bahn, sind die Trajektorien gegen die Bahnrichtung gekrümmt. Entsprechend sind die Trajektorien der Bodenelemente in Richtung der Bahn gekrümmt, wenn ein Punkt innerhalb der Bahn fixiert wird. Diese Linearisierung der Flussvektoren kann benutzt werden, um die Bewegungsrichtung zu kontrollieren. Nehmen wir an, dass während einer Kurvenfahrt nach links eine vorausliegende Stelle fixiert wird, die erreicht werden soll: Wenn der Fahrer übersteuert (zu kleiner Radius) wird er Flusstrajektorien wahrnehmen, die nach rechts gekrümmt sind. Auf der Basis dieser Signals kann er dann seine Korrekturen einleiten.

In diesem Ansatz ist die Ermittlung des gegenwärtigen (tangentialen) Heading nicht notwendig, und man umgeht ebenfalls das Problem der Dekomposition des retinalen Flusses. Wann und Land gehen mit ihrer Kritik an der traditionellen Heading-Forschung sogar soweit, in dem sie behaupten, dass die Bestimmung der Headingrichtung eine *Post-Hoc-Wahrnehmung* sei. Das bedeutet, dass Beobachter nach Aufforderung eine Bewegungsrichtung ermitteln können, sie aber diese nicht in der alltäglichen Kontrolle benutzen (Wann & Land, 2000).

Der Ansatz des linearisierten Flusses kann jedoch auch den zukünftigen Bewegungsweg explizit machen. Dazu muss man nur einer einfachen Regel folgen: „Move the eyes until the image trajectories on the retina are rendered linear; then you are looking in the direction in which you are heading, and the trajectory defined by the perpendicular image vector is your path of locomotion“ (Kim & Turvey, 1999, S. 241). Durch die Verbindung also aller Geschwindigkeitsvektoren, die in der Bildebene senkrecht liegen (horizontale Komponente gleich Null), erhält man die sogenannte *lokomotorische Flusslinie*, von der schon vor Jahren spekuliert wurde, dass sie als visuelle Information zur Kontrolle während einer kurvilinearen Bewegung benutzt werden kann (Lee & Lishman, 1977). Zur oben zitierten Regel sei nachgetragen, dass sie ohne Modifikationen auch zur Bestimmung der Bewegungsrichtung bei einer geradlinigen Bewegung verwendet werden kann.

In einem halben Jahrhundert, seit dem die wissenschaftliche Welt den optischen Fluss kennenlernte, aber in erster Linie in den 25 Jahren, in denen die Bedingungen und Probleme der Headingschätzung auf der Basis von optischen Fluss in den Bereichen Psychophysik, Neurophysiologie und Computerwissenschaften untersucht wurden, gelang es nicht auf eine so

denkbar einfache Lösung zu kommen, wie die des durch visuelle Exploration linearisierten Flusses. Wie Stone und Perrone noch 1997 feststellten: „(...) no computational model of human exocentric heading estimation from optic flow has as yet been proposed“ (Stone & Perrone, 1997, S. 584). Die Idee von Kim und Turvey ist ein schönes Beispiel, das von einem Bewusstsein zeugt, dass Wahrnehmung und Handlung zusammen gehören und ebenso zusammen untersucht werden müssen. Unter Vertretern der ökologischen Psychologie ist diese Denkrichtung allerdings auch nicht ganz so selten. Bis zum jetzigen Zeitpunkt existieren keine empirischen Arbeiten, die diese Idee herausforderten. Diese werden, auch aufgrund der Einfachheit und Eleganz dieser Idee, sicherlich folgen. Eine besonders wichtige Frage dürfe in diesem Zusammenhang sein, ob das visuelle System überhaupt in der Lage ist, solche linearen Verläufe überhaupt zu diskriminieren - sowohl psychophysische wie auch physiologische Untersuchungen könnten Teilantworten darauf liefern.

Allen hier genannten Ansätzen ist gemeinsam, dass die Schätzung oder Kontrolle der Bewegungsrichtung durch koordinierte Fixationen zumindest erleichtert, wenn nicht sogar erst ermöglicht wird. Forschungen, die den systematischen Einsatz der Augenbewegungen zur Kontrolle der Lokomotion untersuchen, haben gerade erst begonnen. Die ersten Ergebnisse legen nahe, dass Augenbewegungen gezielt für eine Aufgabe eingesetzt werden und nicht, wie bisher gedacht, nur unspezifische Reaktionen auf den visuellen Stimulus sind. Man kann sogar den Eindruck bekommen, dass es noch mehr „Wissen“ im prospektiven Einsatz von Augenbewegungen zu entdecken gibt.

STRASSENOBJEKTE UND STEUERVERHALTEN

In diesem Kapitel wird eine Studie beschrieben, die untersucht, welchen Einfluss entgegenkommende, stationäre und überholende Fahrzeuge auf das Lenkverhalten des Fahrers und seine laterale Position auf der Straße haben können. Die Resultate bestätigen frühere Befunde eines generellen Ausweichverhaltens der Fahrer, wenn sie an einem stationären oder entgegenkommenden Fahrzeug vorbeifahren. Wenn die Fahrer jedoch von einem anderen Fahrzeug überholt werden, wird eine Verringerung der seitlichen Distanz beobachtet. Die Ergebnisse werden im Zusammenhang mit der Tendenz, in Blickrichtung zu steuern, und einer Tendenz, das Risiko beim Vorbeifahren zu minimieren, erörtert.

Einleitung

Sicherlich die häufigste, wenn nicht gar die wichtigste Aufgabe beim Führen eines Fahrzeugs ist die, das Fahrzeug in einem sicheren Bereich innerhalb der Fahrbahnbegrenzungen zu steuern. Entsprechend interessierten sich Forscher schon früh in der Geschichte des Automobils für diese perceptuell-motorische Aufgabe, und es entstanden sowohl empirische wie auch theoretische Untersuchungen darüber, wie Menschen die laterale Position ihres Fahrzeugs kontrollieren (Gibson, College, & Crooks, 1938; Pauls, 1925). Es stellte sich heraus, dass das Lenkverhalten und die laterale Position des Fahrzeugs sensitive Maße für die Informationsverarbeitung im Wahrnehmungs-Handlungs-Kreislauf des Fahrers sind, die dazu verwendet werden können, Einblicke in unterschiedliche Aspekte der Fahraufgabe zu erhalten. Die laterale Position auf der Straße ist inzwischen eine der Standardvariablen, die erhoben wird, sowohl wenn endogene Faktoren des Fahrers, wie Müdigkeit, Erfahrung oder Risikobereitschaft, wie auch exogene Umweltfaktoren, wie Sichtbereich, Fahrbahnmarkierungen, oder Beleuchtungsverhältnisse untersucht werden.

Eine der Fragen die im Zusammenhang mit der Positionierung des Fahrzeugs auf der Fahrbahn gestellt wurde, ist die nach der Beeinflussung der seitlichen Position und der Fahrspur durch Objekte nahe der Fahrbahn. In einer der frühesten Arbeiten fand man, dass Fahrer ihren Abstand beim Vorbeifahren an stationären Objekten am Straßenrand vergrößern (Taragin, 1955). In dieser Studie wurden Objekte, wie Autos, Lastwagen und Baustellenabsperungen bis zu einem Abstand von 1.8 m zum Fahrbahnrand platziert. Es wurde festgestellt, dass die Stärke des Ausweichens zunahm, je kleiner der Abstand zum Fahrbahnrand, und je schmaler die Fahrbahn war. Es wurde dabei auch festgestellt, dass eine Ausweichtendenz nur auf der nächstgelegenen Fahrbahn auftrat, und bereits beim größten untersuchten Abstand (1.8 m) keine seitliche Versetzung mehr zu beobachten war. Diese Ergebnisse wurden grundsätzlich von Michaels und Cozan bestätigt. Sie stellten weiterhin fest, dass der Abstand während der Vorbeifahrt an einem stationären Objekt mit der Fahrgeschwindigkeit zunimmt (Michaels & Cozan, 1962). Diese Ergebnisse sind insgesamt nicht überraschend. Wahrscheinlich hat jeder Verkehrsteilnehmer schon an sich selber festgestellt, dass er in solchen Situationen schon ähnlich reagiert. Dieses Ausweichverhalten lässt sich in eine Vorstellung eingliedern, in dem andere Objekte, vor allem nicht-stationäre, mögliche Hindernisse und somit eine Bedrohung darstellen. Das Ausweichverhalten steht demnach, um eine alte Terminologie zu benutzen, in Beziehung zum „field of safe travel“ (Gibson et al., 1938), nämlich als Ausdruck des Fahrers den Bereich des sicheren Fahrens zu vergrößern.

Zu einem gegensätzlichen und überraschenden Ergebnis gelangte später Helander (1978), der das Lenkverhalten von professionellen Testfahrern bei Gegenverkehr untersuchte: Zwei Sekunden bevor das entgegenkommende Fahrzeug passiert wurde, initiierten die Fahrer eine Lenkbewegung *in Richtung* des anderen Fahrzeugs. Helander erklärte diese Beobachtung mit der hohen Wichtigkeit („perceptual significance“) entgegenkommender Fahrzeuge für das Fahrverhalten. Er verglich die Reaktion der Fahrer mit dem tropistischen Verhalten mancher Organismen auf einen sensorischen Reiz (z.B. Ausrichtung zur Sonne), und schlug vor, ein motorisches Verhalten eines Fahrers, das sich nach einem bedeutungsvollen Objekt in der Umwelt ausrichtet, entsprechend als *perzeptuellen Tropismus* zu bezeichnen. Weitere Hinweise auf einen solchen perzeptuellen Tropismus liegen seiner Meinung nach in den Schilderungen von Berufskraftfahrern, die von einer Hinbewegung zu entgegenkommenden Verkehr berichten, in Messungen der lateralen Position während Nachtfahrten (Hemion, 1968¹; zitiert nach Helander,

1) Hemion, R. H. (1968). *The effect of headlight glare on vehicle control and detection of highway vision targets*. San Antonio: Southwest Research Institute.

1978), und in den hohen Unfallraten mit amerikanischen Polizeifahrzeugen. Die Polizeifahrzeuge sollen für manchen Fahrer eine so hohe Bedeutung besitzen, dass dadurch unverhältnismäßig viele Kollisionen entstünden.

Die Studie von Helander ist daraufhin methodologisch kritisiert worden. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Schlussfolgerungen nicht zwingend aus den Beobachtungen folgen, da nur der Winkel der Lenkradstellung aufgezeichnet wurde (Summala, Leino, & Vierimaa, 1981). So könnte eine Lenkbewegung *in Richtung* des entgegenkommenden Fahrzeugs eine Folge davon gewesen sein, dass zuvor die Fahrer ihre lateralen Abstand *zunächst vergrößerten*, und diese Position später korrigieren mussten. So wäre die Lenkbewegung hin zu einem entgegenkommenden Fahrzeug, nicht eine Folge von irgendeinem perzeptuellen Tropismus, sondern eine Kompensation nach einer Ausweichbewegung. Verglichen mit der lateralen Position ohne Gegenverkehr sollte kein Annäherung stattfinden. In ihrer eigenen Studie, in der sie die laterale Position bei entgegenkommenden Verkehr bestimmten, fanden sie eine Tendenz zum Ausweichen. In einer parametrischen Signifikanzanalyse stellte sich diese Tendenz jedoch als nicht signifikant heraus (Summala et al., 1981).

Signifikantes Ausweichverhalten fanden zwei andere Untersuchungen, die mit Videoaufnahmen aus einem nachfolgenden Fahrzeug heraus operierten. (Triggs, 1980; Triggs, 1997). Die meisten Fahrer begannen ca. 5 s vor dem Vorbeifahrereignis den lateralen Abstand zur Mittellinie zu vergrößern, und erreichten den äußersten Punkt 500-800 ms bevor das entgegenkommende Fahrzeug passiert wurde. Das entgegenkommende Fahrzeug bewirkte auch, dass die Positionsvariabilität auf der Straße während des Vorbeifahrens abnahm. Nach dem Vorbeifahren wurde wieder in Richtung der Mittellinie gelenkt (Triggs, 1997). Die einzige Ausnahme von diesem generellen Ausweichverhalten wurde in einer Fahrergruppe beobachtet, die anfänglich am weitesten von der Straßenmitte fuhr. Im Beobachtungszeitraum 10 - 6 s vor der Vorbeifahrt, zeigte diese Fahrergruppe zuerst eine laterale Bewegung zur Straßenmitte, um sich anschließend wieder von der Straßenmitte zu entfernen. Da diese Hinbewegung mit dem großen anfänglichen Abstand zur Mitte zusammenhing und früher als das ansonsten beobachtete Ausweichverhalten auftrat, kann diese Beobachtung jedoch die natürlich auftretende Oszillation widerspiegeln, welche überhaupt nicht in einem Zusammenhang mit dem entgegenkommenden Fahrzeug stehen muss (Triggs, 1997).

In der Summe zeigen die empirischen Untersuchungen eher ein Ausweichverhalten als ein Zusteuern auf ein entgegenkommendes Fahrzeug. Der gängigste Erklärungsansatz geht dabei von einer Minimierung des Kollisionsrisikos mit einem Hindernis aus. Die Fahrer versuchen mögliche

negativen Konsequenzen zu vermeiden, die aus der mangelnden Genauigkeit entstehen, mit der die laterale Position des eigenen Fahrzeugs relativ zur Position des entgegenkommenden vorausgesagt werden kann. Einerseits sind Fahrer mit der Aufgabe konfrontiert, ihre zukünftige Position in Bezug zur Straße zu schätzen. Diverse Untersuchungen legen nahe, dass die Fahrer eine Abschätzung der künftigen Position anhand momentaner Größen wie Geschwindigkeit, Fahrrichtung, Straßenverlauf und Fahrdynamik machen können, und dabei innerhalb einer mehr oder weniger konstanten Sicherheitsmarge bleiben, welche als Zeitmaß operationalisiert werden kann. So wurde gezeigt, dass spätestens 2.5 Sekunden bevor das eigene Fahrzeug voraussichtlich die Seitenbegrenzungen kreuzt, die Fahrer visuelle Informationen zur Richtungskorrektur benötigen (Godthelp, 1986; Godthelp & Käßler, 1988; Godthelp et al., 1984; van Winsum, 1996). Die Beibehaltung dieser Sicherheitsmarge kann sowohl mit Positions- wie auch mit Geschwindigkeitskorrekturen geschehen. Andererseits kann eine Ungenauigkeit der Vorhersage auch vom entgegenkommenden Fahrzeug stammen. Die Fahrer haben dann noch zusätzlich die Schwierigkeit vorherzusehen, welche Position das andere Fahrzeug in der unmittelbaren Zukunft haben wird. Bedeutet dies, dass bei einem entgegenkommenden Fahrzeug die Ungenauigkeit der Vorhersage verdoppelt wird, so dass der Fahrer gut daran tut in diesem Fall eine noch größere Sicherheitsmarge zu beanspruchen und folglich stärker auszuweichen? Andererseits könnten die Fahrer bei einem fahrenden Fahrzeug davon ausgehen, dass sie vom anderen Fahrer bemerkt werden. Da der andere Fahrer ebenso eine Motivation hat sein Risiko zu minimieren, kann erwartet werden, dass dieser seinen Abstand ebenso vergrößern wird, so dass kein zusätzliches Ausweichen notwendig erscheint.

Die zitierten Arbeiten geben nur ungefähre Anhaltspunkte zu dieser Frage. Aufgrund der Befunde, nach denen die seitliche Versetzung bei höherer Fahrgeschwindigkeit zunimmt (Michaels & Cozan, 1962), müsste man bei einem entgegenkommenden Fahrzeug ein verhältnismäßig stärkeres Ausweichverhalten als bei einem stationären erwarten, wenn man annimmt, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Fahrzeug und einem Umweltobjekt, oder eine damit in Verbindung stehende Variable, die entscheidende Größe ist.

In den bisherigen Studien war ferner die Stationarität bzw. Nicht-Stationarität eines Fahrzeugs oder Objektes mit der Präsentationsseite konfundiert. Die stationären Objekte wurden durchgehend, da es sich um Feldstudien handelte, auf der Beifahrerseite platziert, während der Einfluss entgegenkommender Fahrzeuge auf der Fahrerseite untersucht wurde. Deshalb ist es unklar, ob stationären und bewegten Objekten gleich stark ausgewichen wird, unabhängig davon auf welcher Seite sie platziert sind.

Die aufgeführten Einschränkungen waren ein Teil der Gründe, die Frage nach einer systematischen Beeinflussung der lateralen Position durch Straßenobjekte in einer Fahrsimulation zu untersuchen. Die Verwendung einer Fahrsimulation erlaubte auch die Kontrolle einiger Störvariablen, welche in einer Feldbeobachtung auftreten können und dort schwierig zu kontrollieren sind. Störgrößen, die einen Einfluss auf die Spurhaltung haben, wie Straßenneigung, Fahrbahnunebenheiten und vor allem Fahrrinnen im Belag können durch die Simulation ausgeschlossen werden. Darüber hinaus können Geschwindigkeit und seitliche Position eines entgegenkommenden Fahrzeugs exakt vorgegeben werden.

Eine weitere Motivation zu dieser Untersuchung war die Vermutung, dass die Studie von Helander (1978), wenn auch methodologisch unzureichend, womöglich doch einen Effekt erfasst hat, der unmittelbar mit der Präsenz eines salienten Objektes zusammenhängt. Ein salientes Objekt könnte möglicherweise zu einer Aufmerksamkeitsverschiebung oder gelegentlichen Blickrichtungsänderungen führen, welche ihrerseits wiederum zu einem Zusteuern führen können. In der Einleitung von Kapitel 6 wurden einige Beispiele aus dem Bereich der menschlichen Lokomotion aufgeführt, die systematische Beziehungen zwischen der Blick- und der Bewegungsrichtung zeigen. So wird auch gelegentlich von Fahrlehrern und in Büchern zur Fahrausbildung berichtet, dass Fahrer eine Tendenz zeigen, zur Seite ihrer Blickrichtung zu fahren (Bondurant & Blakemore, 1998; Motorcycle Safety Foundation, 1992; TRAINER, online) - jedoch scheint dieser Zusammenhang eher auf persönliche Erfahrung zurück zu gehen, als auf etablierte Ergebnisse experimenteller Untersuchungen. Als eine der ersten experimentellen Untersuchungen berichten Readinger et al. (2002), dass Fahrer, wenn sie über mehrere Sekunden ein seitlich platziertes Objekt beobachten müssen, systematisch in Richtung dieses Objektes lenken. In dieser Studie war das Objekt jedoch ein kleiner Buchstabe, dessen Orientierung berichtet werden sollte, und weniger ein verkehrsrelevantes Objekt. Da dieses Objekt außerdem noch stationär in Bezug zum Beobachter präsentiert wurde, ist ungewiss, ob diese Resultate auch auf Objekte, die sich relativ zum Beobachter bewegen, übertragen werden können. Eine weitere experimentelle Untersuchung zum Zusammenhang zwischen Blick- und Fahrtrichtung wurden in Kapitel 6 beschrieben. Dort wurde gezeigt, dass eine großflächige, seitliche Schneefeldbewegung während der Fahrt dazu führt, dass die durchschnittliche Blickrichtung gegen die Schneefeldbewegung verschoben wird, bevor eine Lenkreaktion in gleicher Richtung initiiert wird. Dieser Zusammenhang zeigte sich auch in einer bedeutsamen Korrelation zwischen Blickrichtung, Kopfposition und Lenkradbewegung.

Um einen potentiellen, wenn auch schwachen Effekt des Hinsteuerns zu einem entgegenkommenden Fahrzeug zu ermitteln, hatten die Probanden in dem folgenden Experiment die Aufgabe, möglichst exakt in der Mitte einer einzigen Fahrspur zu fahren. Es wurde erwartet, dass dadurch die natürliche Variabilität in der lateralen Position so weit verringert wird, dass auch geringfügige Tendenzen entdeckt werden könnten.

Schließlich sollte in diesem Experiment der Einfluss eines anderen Fahrzeugs untersucht werden, wenn die Fahrer von diesem überholt werden. Zum Zeitpunkt, als die Teilnehmer das andere Fahrzeug zum ersten Mal bemerken konnten, hatte das Vorbeifahreignis schon stattgefunden. Damit wurde eine Situation geschaffen, in der die relative Distanz für das zukünftige Verhalten unbedeutend sein sollte. Risiko-minimierende Gründe sollten demnach für die nachfolgenden Reaktionen nicht verantwortlich sein.

Methoden

Neun Teilnehmer wurden in einer Fahrsimulation getestet, in der sie je 60 Fahrten von 30 s absolvierten. Die Teilnehmer wurden instruiert so genau wie möglich in der Mitte einer einspurigen Fahrbahn zu fahren, denn das Ziel des Experimentes sei es zu bestimmen, wie klein die Ungenauigkeit beim Lenken auf einer geraden Straße überhaupt werden könne. Bei der Instruktion wurde Wert darauf gelegt, die Unsicherheit bezüglich des anderen Fahrzeugs zu minimieren und gleichzeitig seine Bedeutung für das Experiment möglichst gering zu halten.

Die Teilnehmer wurden demzufolge darüber informiert, dass in manchen Durchgängen ein Fahrzeug in der Szene vorkommen würde, welches entweder ihnen entgegenfahren oder sie überholen würde. Dabei würde das Fahrzeug immer parallel und außerhalb der Fahrbahn fahren. Es würde niemals die Straße kreuzen und auch keine sonstigen unvorhersagbaren Manöver begehen, so dass sie das andere Fahrzeug einfach ignorieren sollen, um sich einzig auf die Aufgabe zu konzentrieren, in der Mitte der Straße zu fahren.

Die virtuelle Szene bestand aus einer flachen braun-schwarz texturierten Landschaft unter einem orange-schwarzen Himmel mit Wolkenstrukturen (siehe Abbildung 7.1.). Eine gerade Straße von 3.6 m Breite mit grau texturierten Straßenbelag und weißen Seitenlinien war bis zum Horizont sichtbar. Die Straße bestand aus einer einzigen Fahrbahn.

Zu Beginn des Experiments hatte jede Versuchsperson die Gelegenheit zwei bis zehn Durchfahrten zu absolvieren, um sich an die Steuerdynamik des Lenkrades zu gewöhnen. Die Übungsdurchgänge wurde entweder durch die Versuchsperson oder durch den Experimentator beendet, nach-

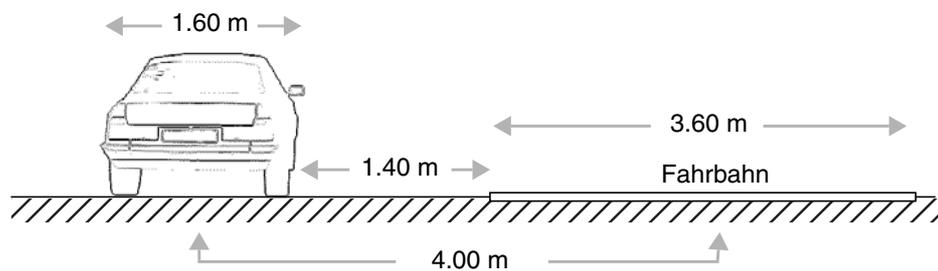
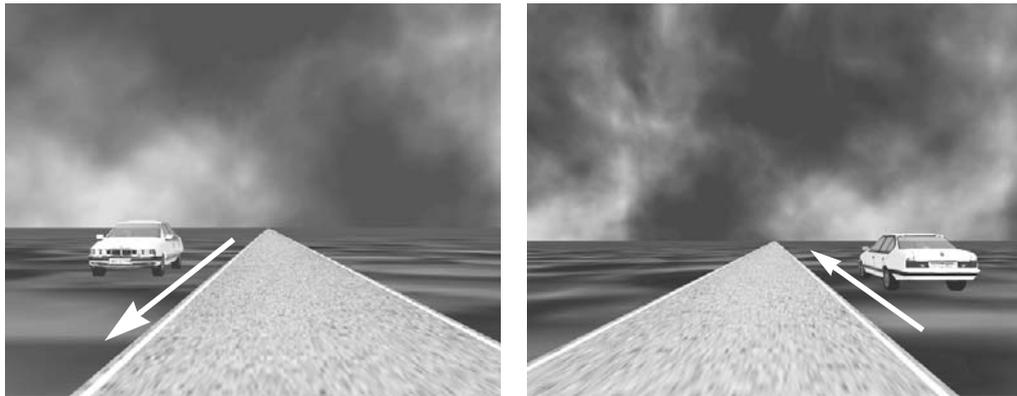


Abbildung 7.1. Szenenansichten mit entgegengerichteten und überholenden Fahrzeugen (oben) und Querschnittsgeometrie der Szene (unten).

dem eine ausreichende Kontrolle des Lenkrads festzustellen war. Am Anfang jedes 30-Sekunden Durchgangs starteten die Teilnehmer mit einer seitlichen Versetzung von 0.5 m, links oder rechts von der Straßenmitte, woraufhin sie sich zur Mitte der Fahrbahn bewegen und bis zum Ende des Durchgangs bleiben sollten. Die Vorwärtsgeschwindigkeit wurde konstant auf 20 m/s (72 km/h) gesetzt. Jeder neue Durchgang wurde durch den Versuchsleiter gestartet.

Die Probanden wurden nach dem Experiment zur Frage interviewt, ob sie sich in den Bedingungen, in denen ein Fahrzeug präsent war, in irgendeiner Weise beeinflusst fühlten. Bis zu drei Fragen wurden hintereinander gestellt, die zunehmend spezifischer formuliert wurden: „Hatten sie den Eindruck, dass das andere Auto sie irgendwie in ihrem Lenkverhalten beeinflusst hat?“, „Sind sie durch das Auto in eine bestimmte Richtung beeinflusst worden?“ und „Gab es einen Unterschied, je nach dem, ob sie dem Fahrzeug entgegengerichtet oder es sie überholte?“. Die zweite und dritte Frage wurde nur bei Bejahung der vorherigen gestellt.

Experimentelle Variation

Sechs von 60 Durchgängen enthielten kein Fahrzeug in der Szene. Die restlichen 54 Durchgänge setzten sich als Kombination dreier experimenteller Faktoren zusammen. Der erste Faktor kennzeichnete die Bewegung des anderen Fahrzeugs (BG): Dieses konnte entweder dem Fahrer mit gleicher Geschwindigkeit entgegenkommen (20 m/s), stationär in der Umwelt sein (0 m/s) oder den Fahrer mit doppelter Eigengeschwindigkeit überholen (40 m/s). In allen Fällen betrug der Abstand von der Fahrzeugmitte bis zur Mitte der Fahrspur 4 m. Der zweite Faktor betraf die anfängliche Startposition (SP) des anderen Fahrzeug, und somit auch die Zeit nach Durchgangsbeginn zu der das Vorbeifahrereignis stattfinden würde. Die Startposition des anderen Fahrzeugs wurde abhängig von seiner und der Geschwindigkeit des Beobachter so gewählt, dass das Vorbeifahren 10, 15 oder 20 Sekunden nach Beginn des Durchgangs erfolgte. Als dritter Faktor wurde die Seite (SE, links/rechts) variiert, an der das Fahrzeug vorbeifuhr. Jede Kombination dieser drei Faktoren wurde drei Mal wiederholt, und die Durchgänge wurden von den Versuchspersonen in zufälliger Reihenfolge absolviert.

Statistische Analyse

Von jeder Fahrt wurden die Positionsdaten mit 72 Hz aufgezeichnet. Der Zeitraum von 10 s vor und nach der Vorbeifahrt wurde zur Analyse herangezogen. Von der lateralen Position in den einzelnen Fahrten wurde der empirische Gesamtmittelwert aller Durchfahrten der Kontrollbedingung abgezogen. Die Position wurde anschließend als Abweichung von der Seite mit dem fahrenden Fahrzeug kodiert. Diese individuellen Zeitreihen wurden in 2-Sekunden-Intervallen aufgeteilt und die jeweiligen Intervallmittelwerte berechnet.

Eine signifikante Änderung der lateralen Position wurde durch eine Varianzanalyse mit Messwiederholung getestet. Einen weiteren Faktor bildete die verbliebene Zeit innerhalb eines Durchgangs bis zum Passieren des anderen Fahrzeugs, die Passierzeit (PZ). Dieser Faktor hatte 11 Stufen, die zu den elf Intervallen des Zeitbereichs 10 Sekunden vor bis 10 Sekunden nach dem Passieren korrespondieren. Eine Änderung der lateralen Position aufgrund des Vorbeifahrereignisses sollte sich dann in einem signifikanten Effekt innerhalb der Stufen des Faktors PZ widerspiegeln. Der Verlauf der Positionsänderung lässt sich dann durch den systematischen Trend innerhalb des Faktors PZ untersuchen. So sollte ein linearer Trend zu beobachten sein, solange die Fahrer ihre Position auf der Straße kontinuierlich hin oder weg vom anderen Fahrzeug ändern. Dagegen sollte ein quadratischer Trend oder ein Trend höherer Ordnung vorzufinden sein, wenn die Fahrer sich

zunächst hin oder weg bewegen und nach dem Vorbeifahreignis wieder eine zentrale Position auf der Fahrbahn einnehmen.

Da die erhobenen Zeitreihen naturgemäß eine große serielle Abhängigkeit aufweisen, und somit eine Verletzung der Sphärizitätsannahme der Varianzanalyse darstellen, wurde ein Korrekturverfahren für die Signifikanzbestimmung notwendig. Verwendet wurde die Huynh-Feldt-Korrektur, die Zähler- und Nenner-Freiheitsgrade durch Multiplikation mit einem Faktor ϵ so erniedrigt, dass der seriellen Korrelation der Daten Rechnung getragen wird (siehe S. 342ff, Bortz, 1999). Zur Berechnung der Varianzanalyse und des Korrekturfaktors ϵ wurde das Statistikprogramm SPSS verwendet (Version 10.0.7, SPSS Inc., Chicago, Illinois).

Ergebnisse

In der Kontrollbedingung, ohne ein anderes Fahrzeug, wurde die Aufgabe, die Mitte der Straße zu halten, mit einer mittleren lateralen Position von -0.04 m (links von der Mitte) sehr genau erfüllt. Dabei konnte man auch eine recht kleine Standardabweichung der lateralen Position im Bereich von 0.02-0.17 m mit einer durchschnittlichen Standardabweichung von 0.09 m beobachten. Diese Werte zeigen, dass die Probanden, wenn man keine Fahrzeugbreite berücksichtigt, in zwei Drittel der Zeit nur 5% der Straßenbreite nutzten.

Die Fahrten, in denen die Fahrer von einem anderen Fahrzeug überholt wurden, wurden getrennt analysiert. Eine Reaktion konnte in diesem Fall erst erfolgen, wenn das überholende Fahrzeug sichtbar wurde, und ein Effekt würde zu einer anderen Passierzeit zu beobachten sein. Die Bedingungen mit einem entgegenkommenden und einem stationären Fahrzeug wurden dagegen einer gemeinsamen Varianzanalyse unterzogen, mit den vier Messwiederholungs-Faktoren Bewegung (BG), Seite des Fahrzeugs (SE), Startposition (SP) und Passierzeit (PZ). Die Varianzanalyse zeigte einen Effekt des Faktors PZ, $F(4.9,39.7) = 4.91$, $p = 0.001$ (Huynh-Feldt-Korrektur). Dies zeigt an, dass der seitliche Abstand in Folge des entgegenkommenden oder stationären Fahrzeugs über die Zeit verändert wurde. Während der Annäherung an das andere Fahrzeug wurde dabei der seitliche Abstand zu diesem vergrößert. Die durchschnittliche laterale Position während des Vorbeifahreignisses ist für das entgegenkommende Fahrzeug in Abbildung 7.2. und für das stationäre Fahrzeug in Abbildung 7.3. dargestellt. Der einzige weitere signifikante Effekt in dieser Analyse betrifft den Faktor BG, $F(1,8) = 5.67$, $p = 0.045$. Hierbei zeigten die Fahrten beim Passieren eines stationären Fahrzeug insgesamt eine höhere Abweichung auf als bei einem entgegenkommenden Fahrzeug (-0.045 vs. -0.024 m). Die Interaktion von PZ und SE erreichte das geforderte Signifikanzniveau nicht, $F(1.6,12.8) = 3.73$,

$p = 0.061$ (Huynh-Feldt-Korrektur). Statt nur einer Tendenz hätte man eine Interaktion zwischen PZ und SE beobachten müssen, wenn unterschiedliche Verläufe in Abhängigkeit von der Seite des Vorbeifahreignisses vorgelegen hätten.

Bei Betrachtung der lateralen Position bei einer links- und rechtsseitigen Vorbeifahrt in Abbildung 7.2. und Abbildung 7.3. erkennt man jedoch deutlich unterschiedliche Verläufe. Wenn das Fahrzeug auf der rechten Seite präsentiert wurde, vergrößerten die Fahrer kontinuierlich ihren Abstand zu dieser Seite bis ein maximaler Abstand ca. zwei Sekunden nach dem Vorbeifahreignis erreicht wurde, und lenkten anschließend wieder zur Straßenmitte zurück. Dies war sowohl bei einem stationären wie auch bei einem entgegenkommenden Fahrzeug der Fall. Eine nachfolgende Trendanalyse bestätigte diesen Verlauf der Abweichungsdaten in einem signifikanten quadratischen Trend für Fahrzeuge auf der rechten Seite im Falle eines entgegenkommenden, $F(1,8) = 29.69$, $p = 0.001$, und im Falle eines stationären Fahrzeugs, $F(1,8) = 7.88$, $p = 0.023$. Bei einem entgegenkommenden Fahrzeug betrug die Abweichung im Durchschnitt ca. 9 cm und bei einem stationären Fahrzeug ca. 12 cm (siehe auch Abbildung 7.4. für einen direkten Vergleich).

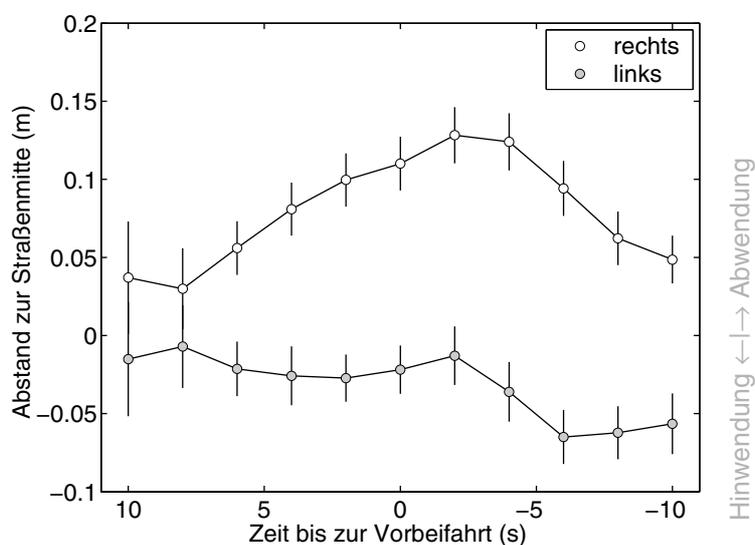


Abbildung 7.2. Durchschnittliche Abweichung von der Straßenmitte, wenn sich die Fahrer einem entgegenkommenden Fahrzeug annäherten und vorbeifuhren, welches auf der rechten (weiße Markierungen) oder linken Seite (graue Markierungen) präsentiert wurde. Die Abweichung ist über die Zeit bis zur Vorbeifahrt aufgetragen, wobei eine positive Zeit (linke Hälfte der Abbildung) die Annäherungsphase kennzeichnet, und ein positiver Abstand bedeutet, dass der Abstand zum anderen Fahrzeug vergrößert wurde. Bei einer Zeit von $t = 0$ s wurde das entgegenkommende Fahrzeug passiert und war bei $t < 0$ s außerhalb des Sehbereichs. Die Daten sind die Mittelwerte von 9 Teilnehmern, und die Fehlerbalken zeigen den Standardschätzfehler der Mittelwerte.

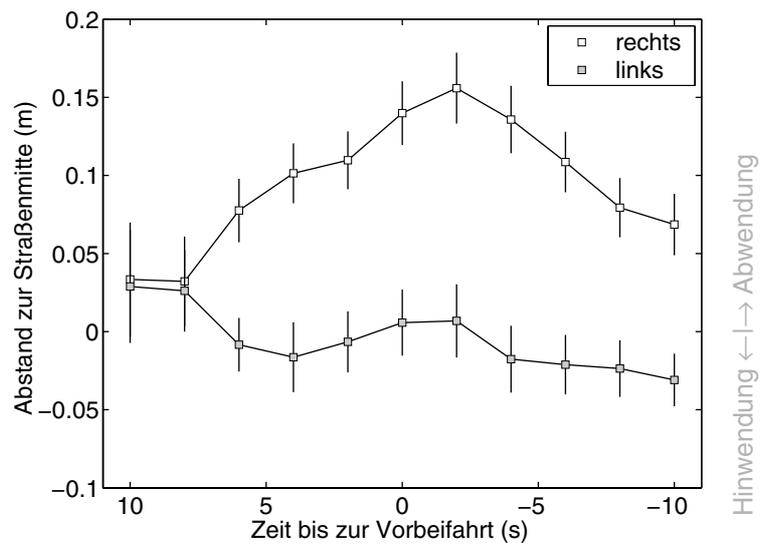


Abbildung 7.3. Durchschnittliche Abweichung von der Straßenmitte, wenn sich die Fahrer einem stationären Fahrzeug annähern und vorbeifahren, welches auf der rechten (weiße Markierungen) oder linken Seite (graue Markierungen) präsentiert wurde. Alle weiteren Details wie in Abbildung 7.2.

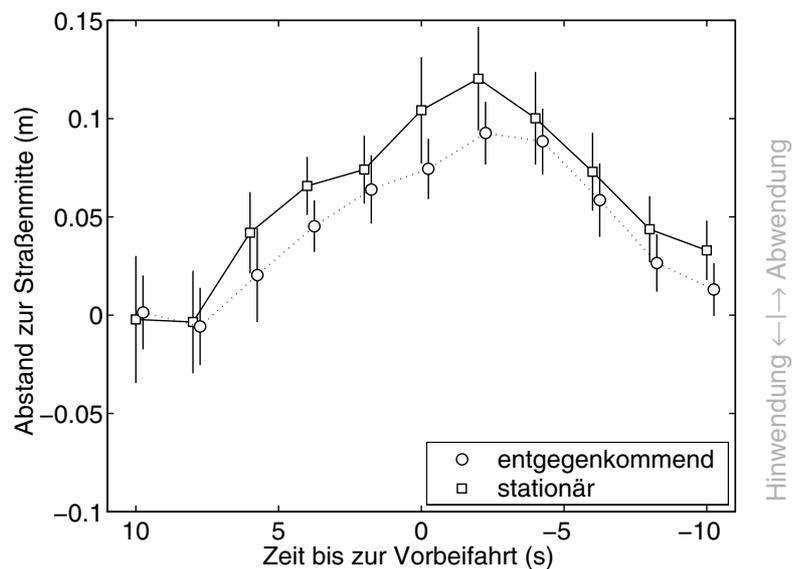


Abbildung 7.4. Direkter Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Ausweichverhaltens beim Passieren eines stationären und eines entgegenkommenden Fahrzeugs. Aufgetragen sind nur die Durchgänge bei denen die Fahrzeuge rechts von der Fahrbahn lagen. Ein positiver Abstand stellt eine Abstandsvergrößerung zum stationären Fahrzeug dar. Zum direkten Vergleich wurde die Verläufe an der Position normiert, die jeder Fahrer 10 s vor der Vorbeifahrt einnahm, so dass der Abstand zur Straßenmitte die relative Veränderung angibt. Fehlerbalken repräsentieren die Standardschätzfehler der Mittelwerte.

Die zeitlichen Verläufe unterschieden sich qualitativ, wenn das Fahrzeug auf der linken Seite dargeboten wurde, also so, wie man normalerweise Gegenverkehr passiert. Ein einfacher quadratischer Trend wurde hier nicht bestätigt (entgegenkommende und stationäre Fahrzeuge, jeweils $F(1,8) < 1$). Die Gemeinsamkeit beider linker Verläufe lag darin, dass zuerst eher eine leichte Hinbewegung zu sehen war, bis zum Zeitpunkt von 2 bis 4 Sekunden vor der Vorbeifahrt, die anschließend in eine Ausweichbewegung überging, die ca. 2 Sekunden nach der Vorbeifahrt endete. Die Zeitpunkt der relativen Maximalabweichung nahe der Vorbeifahrt war somit vergleichbar mit einem Fahrzeug auf der rechten Seite. Dieser komplexe Verlauf wurde bei einem stationären Fahrzeug durch einen signifikanten Trend sechster Ordnung bestätigt, $F(1,8) = 5.41$, $p = 0.048$. Im Fall eines links platzierten entgegenkommenden Fahrzeugs unterschritt kein einziger Trend bis zur zehnten Ordnung die Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0.05$.

Die Ergebnisse der Bedingung mit einem überholenden Fahrzeug sind in Abbildung 7.5. wiedergegeben. Die laterale Position während des Überhole-reignisses wurde in einer eigenen Varianzanalyse analysiert mit den Faktoren SE, SP und PZ. Der signifikante Faktor PZ zeigte, dass sich die laterale Position, nachdem die Fahrer von einem anderen Fahrzeug überholt wurden, ebenfalls signifikant veränderte, $F(1.7,13.5) = 4.76$, $p = 0.032$ (Huynh-Feldt-Korrektur). Die signifikante Zuststeuerung zeigte sich auch in der Trendanalyse des Faktor Passierzeit (PZ). Als einziger signifikanter Trend zeigte sich ein quadratischer Trend, $F(1,8) = 5.68$, $p = 0.044$, während der lineare Trend knapp nicht signifikant war, $F(1,8) = 4.92$, $p = 0.057$. Anders als in den vorherigen Bedingungen, wurde der Abstand zum anderen Fahrzeug hier jedoch verringert. Ungefähr sechs Sekunden nachdem das andere Fahrzeug zum ersten Mal sichtbar wurde, ließ sich diese Tendenz aufzeigen, und es wurde eine Versetzung von 4 cm am Ende des analysierten Bereichs erreicht. Die Präsentationsseite des Fahrzeugs scheint keinen differenziellen Einfluss auf die Position gehabt zu haben, wie die fehlende Interaktion zwischen SE und PZ nahe legte, $F < 1$. Weitere signifikanten Effekte existierten nicht.

Das Zusteuern von rund 4 cm, wenn die Fahrer überholt wurden, fällt im Vergleich zu der Größe der Abweichung, wenn ein Fahrzeug stationär war oder entgegenkam (9-12 cm), kleiner aus. Die Frage stellt sich, wie groß diese Positionsänderungen im Sinne der Effektgröße sind. Berechnet man die Effektgröße f anhand der Assoziationsmaßes η^2 (Varianzaufklärung), liegen die Werte für die Annäherungsbedingungen bei $f = 0.78$ und bei der Überholbedingung bei $f = 0.77$, und sind somit praktisch identisch. Nach allgemeiner Übereinkunft stellen somit beide Effekte einen großen Effekt² dar (Cohen, 1988, S. 287).

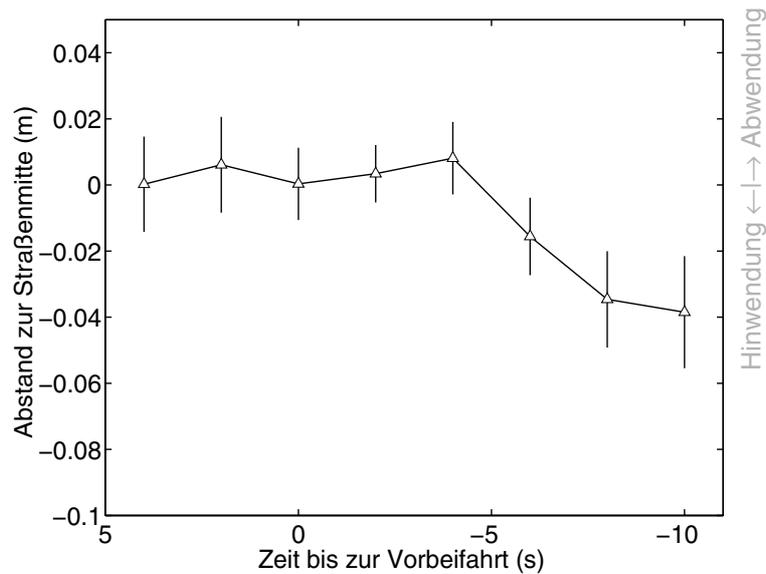


Abbildung 7.5. Abweichung von der Straßenmitte zur Seite eines anderen Fahrzeugs, das die Fahrer mit doppelter Geschwindigkeit überholt. Erst ab einer Vorbeifahrzeit von $t < 0$ s ist das andere Fahrzeug sichtbar. Eine Abweichung in Richtung (= neg. Abstand) des überholenden Fahrzeugs ist ab ca. 5-6 s nach dem erstmaligen Erscheinen zu beobachten. Die Seite des überholenden Fahrzeug stellte sich als nicht signifikant heraus, und die Positionen nach einem links- und rechtsseitigen Überholvorgang wurden gemittelt. Die Daten sind die Mittelwerte von 9 Teilnehmern, und die Fehlerbalken zeigen den Standardschätzfehler der Mittelwerte.

Das nachexperimentelle Interview ergab, dass sechs der neun Probanden angaben, von der Präsenz des anderen Fahrzeugs nicht in irgendeiner Weise beeinflusst worden zu sein. Ein Teilnehmer gab eine Beeinflussung an, die jedoch unsystematisch war und nicht konsistent in eine Richtung zeigte. Ein weiterer Teilnehmer äußerte, dass er den Eindruck hatte, eher den Abstand zum Fahrzeug zu vergrößern, insbesondere am Anfang des Experiments, und nur eine Proband differenzierte zwischen einer Annäherungsbedingung und einer Überholbedingung. Dieser hatte den Eindruck in Richtung des anderen Fahrzeugs gelenkt zu haben, wenn es entgegenkam, und den Abstand zu vergrößern, wenn er überholt wurde.

Diskussion

Drei Hauptergebnisse hat dieses Experiment hervor gebracht. Erstens wurden frühere Befunde einer Ausweichtendenz beim Passieren eines anderen Fahrzeugs in einer Fahrsimulation grundsätzlich bestätigt. Zweitens wurde dieses Ergebnis differenziert, da sich verschiedene Verläufe dieser Ausweichtendenz ergaben, abhängig von der Seite, auf der das andere Fahr-

- 2) Nach Cohen werden Effektgrößen bis 0.1 als „klein“, bis 0.25 als „mittel“, und ab 0.4 als „groß“ angesehen.

zeug passiert wurde. Drittens, konnten diese Befunde um den Fall eines überholenden Fahrzeugs erweitert werden, in dem sich eine Hinwendung zum anderen Fahrzeug zeigte.

Begegnen die Fahrer einem anderen Fahrzeug auf der rechten Seite, so fangen sie ungefähr 6 Sekunden von dem Zeitpunkt der Vorbeifahrt an ihren Abstand zu diesem zu vergrößern, sowohl wenn das andere Fahrzeug stationär in der Umwelt ist wie auch wenn es mit einer gleich großen Eigengeschwindigkeit dem Fahrer entgegenfährt. Beidesmal wird ein maximaler lateraler Abstand ca. 2 Sekunden nach der Vorbeifahrt erreicht und dieser verringert sich im weiteren Verlauf wieder. Dieser Befund stimmt im Wesentlichen mit früheren Feldexperimenten überein (z.B. Michaels & Cozan, 1962; Taragin, 1955; Triggs, 1997). Dass der maximale Abstand erst nach dem Vorbeifahrereignis erreicht wird, während andere Studien diesen nahe oder knapp vor dem Vorbeifahrzeitpunkt finden (Triggs, 1997), könnte auf eine Unterschätzung der Geschwindigkeit in der verwendeten Fahrsimulation zurückzuführen sein oder in einer Überschätzung des Abstands. Verglichen mit dem jüngstem Experiment auf realer Straße (Triggs, 1997), in dem der Beginn des Ausweichens ca. 5 Sekunden vor dem Vorbeifahrzeitpunkt lokalisiert wird, besteht eine gute Übereinstimmung. Die Dauer des Ausweichverhaltens ist dagegen in dieser Untersuchung mit ca. 8 Sekunden etwas länger als das auf realer Straße (ca. 5 Sekunden).

Ausweichen und perzeptuelle Größen

Eine Motivation für dieses Experiment war der direkte Vergleich eines stationären mit einem entgegenkommenden Fahrzeug. Betrachtet man erstmalig nur Vorbeifahrten an einem rechts positionierten Fahrzeug, zeigt sich ein vergleichbarer Verlauf des Ausweichens in beiden Fällen, wenn die laterale Position über die Zeit bis zur Vorbeifahrt aufgetragen wird. In beiden Fällen wird mit dem Ausweichen zum selben Zeitpunkt begonnen und die seitliche Geschwindigkeit ist nahezu identisch (siehe auch Abbildung 7.4.). Dies deutet darauf hin, dass die Zeit, diejenige Variable ist, die das Verhalten steuert. Dafür kann die verbleibende Zeit geschätzt werden, indem die Geschwindigkeit des anderen Fahrzeugs in Relation zum aktuellen Abstand gesetzt wird, aber auch indem sogenannte „direkte“ perzeptuelle Variablen, wie die Expansionsrate des Fahrzeugs, verwendet werden (z.B. Andersen et al., 1999; Cavallo & Laurent, 1988; Lee, 1976). Es wurde gezeigt, dass die verbleibende Zeit bis zu einer Kollision durch das Verhältnis der Bildgröße eines Objekts zu Bildgrößenänderung annähernd exakt gegeben ist, und genutzt werden kann (Lee, 1976; Lee & Reddish, 1981). In dem hier untersuchten Fall, wo das Objekt nicht auf Kollisionskurs ist, wäre eine Schätzung der Passierzeit über die Expansionsrate zwar nicht hundertprozentig korrekt, aber noch von akzeptabler Genauigkeit. Der Fehler bei dieser Art der

Schätzung in diesem Experiment liegt beispielsweise 6 Sekunden vor der Vorbeifahrt bei unter 1%, und 3 Sekunden später immer noch bei akzeptablen 2.4%. Der Beginn des Ausweichens ist ferner in überraschender Übereinstimmung mit der unteren Schwelle der Expansionsgeschwindigkeit. Man könnte vermuten, dass zu jenem Zeitpunkt eine Reaktion eingeleitet wird, zu dem die Fahrer die relative Änderung der Objektgröße anfangen wahrzunehmen. Ein stationäres Fahrzeug hat 6 Sekunden vor dem Passieren bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s eine Expansionsrate von 0.13 °/s. Für Erwachsene wurde als untere Schwelle eine Expansionsrate von 0.11 °/s ermittelt (Hoffmann, 1994).

Gleichzeitig kann man auf Grund dieser Ergebnisse einige andere perzeptuellen Variablen für die Steuerung des Ausweichverhaltens ausschließen. So wird das Ausweichen nicht auf der Basis des longitudinalen Abstandes zum anderen Fahrzeug reguliert. Zu einer gegebenen Zeit bis zur Vorbeifahrt hat das stationäre Fahrzeug nur einen halb so großen Abstand wie das entgegenkommende Fahrzeug, und man würde bei einer Regulation über den Abstand erwarten, dass bei einem stationären Fahrzeug das Ausweichverhalten zeitlich früher begonnen wird. Die gleiche Argumentation kann gegen die scheinbare Objektgröße geführt werden, da das stationäre Fahrzeug bei einer gegebenen Zeit bis zur Vorbeifahrt doppelt so groß erscheint. Ebenso auszuschließen ist die Winkelgeschwindigkeit als perzeptuelle Größe. Das entgegenkommende Fahrzeug besitzt zwar eine höhere absolute Geschwindigkeit, aber wegen der größeren Distanz ist seine Winkelgeschwindigkeit bis auf eine kurze Zeit vor der Vorbeifahrt (< 1 s) immer kleiner als die eines stationären Fahrzeugs. Wäre die Winkelgeschwindigkeit verwendet worden, hätte man deutliche Unterschiede zwischen einem stationären und einem entgegenkommenden Fahrzeug erkennen müssen. Die relative Geschwindigkeit zwischen dem eigenen und einem anderen Fahrzeug scheint demnach keine bedeutende Rolle zu spielen. Vielmehr scheint dann die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Versetzung (Michaels & Cozan, 1962), sich auf die Fahrgeschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs zu beziehen. Dies würde bedeuten, dass die Fahrer mit der Ausweichtendenz eher die Ungenauigkeit in der Vorhersage der Position des eigenen Fahrzeugs statt des anderen zu kompensieren versuchen. Um eine solche Interpretation weiter abzusichern, sollte allerdings das Ausweichverhalten unter Bedingungen überprüft werden, in denen entgegenkommende Fahrzeuge eine gewisse Variabilität in der lateralen Position zeigen, und nicht wie in diesem Experiment, jeweils auf einer exakt parallelen Bahn zum Straßenverlauf fahren.

Asymmetrie der Reaktion ein Artefakt?

Wurde ein linksseitig fahrendes oder stehendes Auto passiert, konnte keine Ausweichbewegung beobachtet werden. Was bedeutet diese Anisotro-

pie der Fahrerreaktion, die bisher in keiner der bekannten Arbeiten erwähnt wurde? Es ist vielleicht erstmal sinnvoll zu fragen, ob diese fehlende Ausweichbewegung nicht ein spezifisches Ergebnis der Versuchsdurchführung und der Aufgabe sein könnte, und deshalb noch nicht beobachtet worden ist. Ein Einwand gegen eine „echte“ Asymmetrie der Präsentationsseite könnte die Instruktion an die Probanden betreffen. Normalerweise wird auf realer Straße so gefahren, dass die Längsachse des Fahrzeugs in der Mitte der Fahrspur liegt und die Fahrer sich entsprechend links von der Fahrspurmitte versetzt befinden. Vom Kopf des Fahrers aus gesehen ist dann der Abstand zur linken Fahrspurbegrenzung kleiner als zur rechten Seitenlinie. Da die Fahrer in diesem Experiment im Unterschied zur realen Fahrsituation sich genau in der Mitte der Fahrbahn positionieren mussten, kann dies zur Folge gehabt haben, dass der subjektive Toleranzbereich zur rechten Seite eingeschränkt und gleichzeitig zur linken Seite vergrößert worden ist. Kam nun auf der rechten Seite ein Fahrzeug entgegen, kann dieser Abstand als zu klein empfunden worden sein. Im entgegengesetzten Fall, wenn das Fahrzeug auf der linken Seite entgegenkam, kann der Abstand als ausreichend interpretiert worden sein, da er größer als „normal“ war. Gemäß diesen Annahmen kann sowohl der ausreichend große Abstand nach links, wie auch der kleinere Toleranzbereich nach rechts dazu geführt haben, dass sie Fahrer sich nicht veranlasst sahen, ihre Position zu ändern, wenn das andere Fahrzeug ihnen links entgegenfuhr.

Gegen dieses Argument kann man anführen, dass es den Fahrern sehr gut gelungen ist in der Mitte der Straße zu fahren. Der Gesamtmittelwert in den Kontrollbedingungen ohne ein weiteres Fahrzeug von 4 cm links von der Mitte bei einer mittleren Standardabweichung von unter 10 cm, zeugen davon. Typische Standardabweichungen bei vergleichbaren Straßenbreiten in Fahrsimulationen liegen bei 15 bis 35 cm mit einer deutlichen Mittelwertverschiebung von 20 bis 30 cm. Ein zu kleiner Toleranzbereich auf der rechten Fahrbahnseite hätte es den Probanden erschweren müssen, eine solche Genauigkeit zu erreichen. Weiterhin lässt sich anführen, dass man bei einem kleineren Toleranzbereich eine geringere Reaktion der Fahrer zwar hätte erwarten dürfen, jedoch bei insgesamt ähnlichen Verlauf. Die Verläufe in der lateralen Änderung jedoch zeigen, dass die linksseitigen Reaktionen nicht einfach eine skalierte Version der rechtsseitigen sind, sondern ein komplexeres Muster haben. Sie beinhalten Phasen sowohl des Zu- wie auch des Wegsteuerns, die sich in den zum Teil signifikanten Trends hoher Ordnung zeigen. Merkwürdig erscheint dann in diesem Zusammenhang auch die leichte Hinwendung nach dem Vorbeifahrereignis. Schließlich zeigen die Ergebnisse der Überholbedingung, dass die Fahrer sehr wohl symmetrische Abweichungen zur linken und rechten Seite produzieren können, das viel-

leicht stärkste Argument, das gegen einen durch die Aufgabe einseitig verringerten Toleranzbereich spricht.

Alle Argumente können keine experimentelle Überprüfung ersetzen und es kann hier nicht ausgeschlossen werden, dass die spezielle Instruktion nicht zumindest einen kleinen Effekt auf die Resultate hatte. Sollte diese Anisotropie der Reaktion in Abhängigkeit von der Seite Bestand haben, müsste das folgende Argument berücksichtigt werden. Ein Fahrer kann eine frühe Abstandverminderung dazu einsetzen, dem entgegenkommenden Fahrer seine Anwesenheit zu signalisieren und ihn möglicherweise dazu „drängen“, dass er seinerseits einen seitlichen Sicherheitsabstand wahren soll. Gemäß dieser Interpretation sollte man nicht erwarten, dass eine solche strategische Reaktion auch bei einem rechtsseitig liegenden Fahrzeug auftritt, da hier für gewöhnlich die Fahrzeuge entweder parken oder sich zumindest nicht in Gegenrichtung bewegen. Ein weiterer Faktor, der ebenfalls mit der Tatsache zusammenhängt, dass auf der linken Seite sich die Fahrzeuge in Gegenrichtung bewegen, und eine Kollision zu fatalen Folgen führen würde, betrifft eine möglicherweise häufigere Blickzuwendung. Das von einem fahrenden Auto ausgehende höhere Risiko sollte zu einer höheren Bedeutsamkeit oder Salienz führen, die häufigere Fixationen bedingt. Diese Konzeption gleicht im Wesentlichen der von Helander (1978), nur um die Forderung erweitert, dass sich die Bedeutsamkeit auch in den Blickbewegungen niederschlagen sollte. Im realen Verkehr wurde festgestellt, dass eine Mehrheit von zwei Drittel der Blickfixationen auf die Fahrbahn gerichtet sind, wenn kein Fahrzeug vorausfährt, aber auch dass Blicke links von der eigenen Fahrbahn häufiger vorkommen als rechts, wobei dieser Unterschied mit der Betrachtung des Gegenverkehrs in Verbindung gebracht wurde (Liu, 1998). Eine Replikation dieses Experimentes mit gleichzeitiger Erfassung der Blickrichtung könnte nützliche Hinweise in diese Richtung liefern. Eine Erweiterung der Simulation um einen „intelligenten“ Gegenverkehr, der auf die laterale Position des Teilnehmers reagiert, wäre eine Möglichkeit, die dynamische Beziehung zweier Fahrzeuge auf Passierkurs und damit die natürliche Reaktion der Fahrer besser zu verstehen.

Überholen und Hinwendung

Der gänzlich neue Befund, den dieses Experiment hervorgebracht hat, ist die Positionsveränderung in Richtung eines überholenden Fahrzeugs. Die Reaktion war gleichermaßen zu einem links- wie auch rechtsseitig überholenden Fahrzeug zu beobachten und begann ca. 5 Sekunden nach dem Passierereignis. Was hat sich unter dieser Bedingung geändert, dass aus der vorher beschriebenen Tendenz auszuweichen eine Tendenz des Zusteuerns wurde? Im Wesentlichen scheinen zwei Punkte wichtig zu sein. Das andere Fahrzeug erschien abrupt und konnte nicht antizipiert werden. Und es ver-

größerte laufend seinen longitudinalen Abstand zum Fahrer, so dass es für den Fahrer kein potentiell Kollisionsobjekt mehr darstellte.

Kann einfach die Bewegung im visuellen Feld zu der beobachteten Zuwendung geführt haben? Wie im Kapitel 2 gezeigt wurde, kann das Geschwindigkeitsverhältnis auf beiden Seiten genutzt werden, um die laterale Position zu kontrollieren. Durch das überholende Fahrzeug wurde auf einer Seite des Blickfeldes die ansonsten symmetrische Geschwindigkeitsinformation stark verändert, und die nunmehr „zu niedrige“ Bildgeschwindigkeit kann als ein zu großer Abstand interpretiert worden sein, so dass die Fahrer eine Korrektur zu Verringerung der Distanz eingeleitet haben könnten. Das Hauptargument gegen diese Interpretation ist die relativ lange Latenz nach dem erstem Erscheinen des Fahrzeugs. Die Korrekturen aufgrund von Unterschieden in der Winkelgeschwindigkeit erfolgten verhältnismäßig schnell innerhalb von 1 bis 2 Sekunden. Wenn die Reaktion hier jedoch erst nach 5 Sekunden auftritt, hat das andere Fahrzeug bereits einen Abstand von 100 m. Es ist zu diesem Zeitpunkt weniger als 4° vom Fluchtpunkt der Straße entfernt. Diese späte Reaktion macht es dann auch unwahrscheinlich, dass dieses Verhalten in enger Beziehung mit dem abrupten Erscheinen des überholenden Fahrzeugs steht. Aufgrund eines solchen „Überraschungseffekts“ kann man auch wenig sinnvolle Vorhersagen treffen über die Richtung, die eine mögliche Beeinflussung haben könnte. Wenn man überhaupt statt einer unsystematischen Beeinflussung eine systematische Tendenz erwarten würde, dann vielleicht eher weg von der Überholseite.

Die favorisierte Erklärung setzt folglich am fehlenden Kollisionsrisiko an. Nehmen wir für einen Augenblick als gesichert an, dass immer wenn ein Objekt fixiert oder mit den Augen verfolgt wird, auch eine Abweichung der Lauf- oder Fahrriichtung in die gleiche Richtung entsteht. Diese Tendenz kann aber durch andere Bestrebungen außer Kraft gesetzt, oder besser gesagt, überlagert werden. Wenn ein Fahrzeug dem Fahrer entgegenkommt wird es gelegentlich fixiert. Ein Zusteuern findet aber nicht statt, da eine Ausweichtendenz überwiegt, die das Risiko einer Kollision minimieren will. Man beobachtet stattdessen eine Vergrößerung des seitlichen Randabstandes, weg von der Seite der möglichen Kollision. Im Falle des Überholtwerdens liegen die Dinge anders. Es fällt das Kollisionsrisiko weg. Der Fahrer wendet seinen Blick jedoch nicht unmittelbar dem überholenden Fahrzeug zu, oder zumindest nicht für sehr lange, denn er muss simultan noch seine Fahraufgabe im Auge behalten. Rückt das überholende Fahrzeug jedoch näher ins zentrale Blickfeld, wird er es gelegentlich fixieren, ohne dass dazu große Blickbewegungen gemacht werden müssen. Es resultiert die beobachtete Hinwendung, da keine Ausweichtendenz die Tendenz der Blick-Fahr-

richtungs-Kopplung neutralisieren oder umkehren kann. Die Stärke dieser Hinwendungstendenz könnte davon abhängig sein, wie häufig und mit welcher Exzentrizität solche Blickabwendungen pro Zeit von der Straße vorkommen.

In dieser Vorstellung sind einige Punkte sehr spekulativ. Wir kennen die genauen Bedingungen, unter denen eine solche Blick-Fahrriichtungs-Kopplung vorkommt, nicht, und auch nicht welches Ausmaß sie annehmen kann. Es wurde hier davon ausgegangen, dass die wesentliche Variable in dieser Beziehung die Exzentrizität der Blickrichtung ist, und der Begriff der Aufmerksamkeit und eine mögliche Verschiebung wurde vermieden. Blickrichtung und Aufmerksamkeitsfokus können jedoch experimentell getrennt werden, und der Beitrag der Aufmerksamkeit getestet werden. Die Faktoren, die in ein Konzept der Risikominimierung oder Kollisionsvermeidung einwirken sind sicherlich vielfältig. Es gibt dabei vielleicht auch einige Faktoren, die sowohl die Risikominimierung wie auch die Blickrichtung beeinflussen. Man sollte aber auch einige Faktoren vermuten, die auf beide Tendenzen unterschiedlich wirken könnten, und damit erst eine experimentelle Überprüfung zulassen. Die Häufigkeit der Blickzuwendung sollte mit der Salienz in Beziehung stehen, ein salientes Objekt aber nicht automatisch ein höheres Risiko bedeuten. Ein seltenes, und deshalb salienteres Ereignis, beispielsweise selten entgegenkommender Verkehr, sollte mehr Blickzuwendungen auslösen als häufiger Gegenverkehr. Das Kollisionsrisiko bei jedem einzelnen Vorbeifahrereignis sollte jedoch gleich bleiben. Man würde nach dieser Vorstellung den kontraintuitiven Ausgang erwarten, dass bei seltenem Gegenverkehr weniger stark ausgewichen wird als bei häufigem.

Auf die Studie von Helander (1978) zurückkommend, deren Ergebnisse diese Arbeit durch den Befund einer Lenkreaktion in Richtung entgegenkommender Fahrzeuge motivierte, lässt sich feststellen, dass dort wohl mehr als ein methodologisches Artefakt beschrieben wurde. Dass die Ergebnisse von Helander diametral zu allen anderen Studien lagen, kann vielleicht daran gelegen haben, dass er professionelle Fahrer rekrutierte hatte. Geübte Fahrer könnten, ihren Fähigkeiten vertrauend, das Risiko eines Vorbeifahrereignisses durchaus niedriger einschätzen als weniger geübte, so dass eine Zusteuerntendenz auch gelegentlich überwiegen kann. Sollte dies tatsächlich der Fall sein, ist Vorsicht vor den Profis geboten. Die überzufälligen Kollisionen mit amerikanischen Polizeifahrzeugen müssten dann vielleicht neu interpretiert werden - mit einem möglichen Ergebnis, dass der normale Fahrer den Polizeifahrzeugen *nicht zuviel* Bedeutung beimisst, sondern die Polizisten den zivilen Fahrzeugen einfach *zu wenig*. Aus dem Ratsschlag „schau, wohin du läufst“ (meine Mutter, persönliche Kommunikation), über den experimentellen Befund „du läufst, wohin du

schaust“ (Readinger et al., 2002), könnte dann ein „schau, wo du bleibst, wenn sie dich erblicken“ werden.

SCHLUSSBEMERKUNG

Es wurde gezeigt, dass die Fahrer durch eine Reihe von Faktoren *systematisch* in ihren manuellen Reaktionen beeinflusst werden. So konnte gezeigt werden, dass ein einfacher visueller Parameter, wie die Geschwindigkeit im optischen Fluss, mit Hilfe einer einfachen Strategie zur Regelung des seitlichen Abstand genutzt wird (S. 21 ff). Durch die Überlagerung von störendem optischen Fluss auf die Fahrszene wurden visuelle Wechselwirkungen erzielt, die zu Veränderungen der lateralen Position und Blickrichtung führten (S. 105 ff). Schließlich konnte eine Verkehrsszene geschaffen werden, in der wahrscheinlich aufgrund einer veränderten Blickstrategie ein systematisches Zusteuern auf ein anderes Fahrzeug beobachtet werden konnte (S. 173 ff). Alle diese Effekte wurden trotz einer verhältnismäßig einfachen Aufgabe erzielt und obwohl weitere visuelle Hinweisreize, an erster Stelle Seitenlinien, vorhanden waren. Was bedeuten diese Befunde im Hinblick auf die in der Einleitung zitierte Einschätzung von Land (1998), dass die Orientierung der Seitenlinien die „principal visual cues for steering“ darstellen, welche *notwendig* und *ausreichend* sein sollen, und dem Rest des optischen Flussfelds keine *direkte* und *essentielle* Bedeutung beigemessen wird?

Nun sollte nicht vorschnell behauptet werden, diese Einschätzung sei falsch. Dass Seitenlinien *notwendig* sind, ist unstrittig, wenn man davon ausgeht, dass damit Fahrbahnbegrenzungen im Großen und Ganzen gemeint sind. Notwendig sind sie deshalb, weil nur durch sie die Aufgabe des Fahrers - nämlich sein Fahrbereich - definiert ist. Auf jeden Fall sind Seitenlinien *ausreichend*. Dies zeigt jede erfolgreich durchgeführte Nachtfahrt, bei der kaum mehr als die weißen Seitenmarkierungen zu sehen waren. Aber an was hätte man sich denn auch sonst orientieren sollen? Vielleicht zeigt dieses Beispiel nur, wie anpassungsfähig Menschen sind, und dass sie eben die Information verwenden, die ihnen vorliegt.

Einen höheren erfahrungswissenschaftlichen Wert hat dann die Aussage, dass das optische Flussfeld nicht in *direkter* und *essentieller* Weise bei der Fahraufgabe beteiligt ist. Wie diese Aussage auf der Basis der neuen, hier erzielten Beobachtungen zu bewerten ist, scheint vom Betrachtungsstandpunkt abzuhängen. Ist es nicht sehr *direkt*, wenn eine hohe Geschwindigkeit unmittelbar als ein zu kleiner Abstand interpretiert und darauf unverzüglich reagiert wird? Oder ist die Größenordnung der Effekte nicht groß genug, dass man von einer essentiellen Bedeutung sprechen kann, zumal zu diesen Experimenten vergleichbare Situationen beim Fahren nicht die Regel sind, und vielleicht nur mit Fahrten in Straßentunnel und zwischen Lärmschutzwänden verglichen werden können? Zugegebenermaßen sind manche der hier erzielten Effekte, in Metern ausgedrückt, relativ klein. Es sollte hierbei aber auch bedacht werden, dass selbst die numerisch kleinen Effekte statistisch gesehen mittlere bis große Effektstärken aufweisen, und dass kein Versuch unternommen wurde, einen vermuteten Einfluss einer bestimmten Informationsquelle zu maximieren.

Für die Einordnung und Interpretation der hier erzielten Ergebnisse könnte man sich vorläufig auf den folgenden kleinsten Nenner einigen: Die Lage und Orientierung von Seitenlinien stellt weiterhin die wichtigste Information für das Fahren dar. Gleichzeitig soll dabei anerkannt werden, dass die Urteile und Reaktionen der Fahrer auch durch Information über Geschwindigkeit, räumliche Strukturen und dynamisch angezeigte Bewegungsrichtung bestimmt werden, und zwar in nicht unerheblicher Weise. Das stellt normalerweise für den Fahrer auch kein Problem dar, denn in der Regel besteht zwischen diesen Hinweisreizen kein Konflikt - sie sind entweder redundant oder ergänzen sich mit der Information über Seitenlinien. Nur in Ausnahmefällen kann, wie im Schneefallbeispiel gezeigt, in der Realität eine Situation eintreten, die durch den Konflikt der Informationsquellen den Fahrer veranlasst, nicht nur unsicherer zu werden, sondern auch systematische Fehler zu begehen.

Schließlich sollte noch berücksichtigt werden, dass ein „principal cue“ sich durch etwas Weiteres auszeichnen könnte. Nicht nur das Leistungsniveau, das mit einem bestimmten Hinweisreiz erreicht wird, sollte betrachtet werden, sondern auch mit welcher Anstrengung oder Leichtigkeit dies geschieht. Dazu die folgende Beobachtung: Wenn eine einzelne, zentrale Führungslinie den (optimalen) Fahrkurs definierte, anstatt der zwei üblichen Seitenmarkierungen, zeigten Fahrer eine um fast 50% reduzierte Abweichung vom optimalen Kurs (Chatziastros, 1997). Die Fahrer erlebten diese Bedingung im Vergleich zu zwei Seitenlinien allerdings auch als viel schwieriger, ein Gefühl, das sich mit der Häufigkeit der Lenkkorrekturen objektivieren ließ: Sie strengten sich in dieser Bedingung mehr an. Man

könnte aufgrund dieser Beobachtungen nun nicht behaupten, dass eine einzelne Linie der bessere Hinweisreiz sei, da man nicht weiß, welche Abweichung vom optimalen Kurs die Probanden bei gleicher Anstrengung erreicht hätten. Es ist nämlich durchaus denkbar, dass ein Hinweisreiz, der eine höhere Performanz im Sinne der experimentellen Aufgabe ermöglicht, bei einer vergleichbaren Anstrengung nicht zu einer besseren Leistung führt als ein vormals schlechterer. Als wichtige Hinweisreize sollten dann solche Informationsquellen erachtet werden, die mit einer gewissen Leichtigkeit aufgenommen und verarbeitet werden können und dennoch zu guten Leistungen führen.

Dies ist insofern von Bedeutung, da in einer realen Situation kognitive Ressourcen (womit der Begriff "kognitiv" wenigstens einmal in dieser Arbeit verwendet worden ist) wahrscheinlich nicht immer vollständig ausgeschöpft werden und eher zwischen Aufgaben verteilt werden müssen - in der experimentellen Situation dagegen wird meist eine einzelne Aufgabe untersucht, in der die Probanden eine Art maximales Können zeigen müssen. Um nicht nur derartige Spitzenleistungen, sondern menschliches Verhalten in einem komplexen, natürlichen Kontext zu verstehen, könnte man daraus für das experimentelle Vorgehen die folgende Forderung ableiten: Noch realitätsnähere Aufgaben, bitte.

ANHANG 1

SIMULATIONSANBAU

Die Untersuchungen dieser Arbeit sind in einer Versuchsumgebung durchgeführt worden, die unter der Bezeichnung „virtuelle Realität“ (virtual reality) eine Reihe technischer Komponenten zu einer Simulationsanlage vereint. Mit Hilfe dieser Komponenten können realitätsnahe (naturalistische) Umgebungen dargestellt werden, in denen ein Beobachter, besser gesagt, Teilnehmer, aktiv handeln kann. Für die Untersuchung der menschlichen Wahrnehmung und Handlung bietet die Technik der virtuellen Realität ein sehr hohes Maß an Kontrolle und Replizierbarkeit der Versuchsbedingungen, bei einem gleichzeitig hohen Grad an Modifikationsmöglichkeiten, der so in natürlicher Umgebung nicht oder nur mit großen Aufwand erreicht werden kann.

Hier wird der technische Aufbau der Simulationsumgebung beschrieben, der allen hier beschriebenen Experimenten zugrunde liegt. Das experimentelle Protokoll und die Beschreibung der visuellen Stimuli sind jeweils im Methodenteil der einzelnen Experimente aufgeführt. Hier wird lediglich dargestellt, was allen Experimenten an Projektion, Hard- und Software, sowie Eingabegeräten gemeinsam ist. Eine Beschreibung der Simulationsanlage am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik mit weiteren experimentellen Schwerpunkten findet sich auch in van Veen, Distler, Braun und Bülthoff (1998). Abweichungen von dieser Beschreibung sind im Methodenteil der Experimente aufgeführt.

Projektion

Die Szenen wurden auf einen zylindrischen Projektionsleinwand dargestellt, mit einem Durchmesser von 7 m und einer Höhe von 3.15 m. Die Versuchsteilnehmer wurden grundsätzlich in der Mitte des Projektionszylinders positioniert und hatten ein effektives Blickfeld von 180° horizontal und 50° vertikal. In horizontaler Richtung entspricht dieses Blickfeld fast dem binokularen Gesichtsfeld (Sehbereich mit fixiertem Kopf und ohne Augenbewegungen).

Das Gesamtbild auf der Leinwand wurde durch drei Einzelbilder zusammengesetzt, die jeweils durch einen CRT-Videoprojektor (Electrohome Marquee[®] 8000, Electrohome Limited, Kitchener, Ontario, Canada) aufprojiziert wurden. Jedes Einzelbild bestand aus 1280x1024 Pixel. Um einen homogenen Übergang zwischen den Einzelbildern zu erreichen, wurden die Einzelbilder zu 7.5° überlappt und die Helligkeit der Pixel in diesem

Bereich mittels eines Soft-Edge-Blending-Verfahrens (Panoram PanoMarker™ II, Panoram Technologies, Inc., Sun Valley, CA, USA) angepasst. Dadurch ergab sich eine Gesamtauflösung auf der Leinwand von ca. 20 Pixel/°. Die Bildwiederholrate (refresh-rate) der Videoprojektoren betrug 72 Hz.

Hardware und Software

Die Simulation inklusive aller Ein- und Ausgaben lief auf einem Multiprozessor-Graphikrechner Silicon Graphics Onyx2 InfiniteReality2™ mit 3 Graphik-Pipelines, 10 Prozessoren R10000 mit 195 MHz, 2.5 GB Arbeitsspeicher und 3 mal 64 MB Texturspeicher (Silicon Graphics Inc., Mountain View, CA, USA). Die Simulationen wurden in der Programmiersprache C unter Verwendung der Funktionsbibliotheken von OpenGL® und IRIS Performer™ programmiert. Insbesondere die letztgenannte Bibliothek liefert Funktionen zur effizienten Steuerung von Simulationen in Echtzeit und zur graphischen Präsentation mit mehreren Graphik-Pipelines. Je nach Komplexität der Szenerie wurde eine Aktualisierungsrate (update-rate) von mindestens 24 und höchstens 72 Hz während der Experimente erreicht. Die tatsächlich erreichte Aktualisierungsrate ist jeweils im Methodenteil der Experimente nochmal aufgeführt.

Eingabegeräte

In den Experimenten, in denen eine aktive Steuerung seitens des Probanden verlangt wurde, wurde entweder mittels eines Lenkrades oder einer Computermaus gelenkt. In Experimenten, die nur einzelne Entscheidungen benötigten, wurde über die Tastatur oder mit einem Joystick geantwortet.

Das Lenkrad war ein hauseigener Umbau eines handelsüblichen Lenkrads. Das Lenkrad wurde mit einem Gleichstrommotor verbunden, der realistische Rückstellkräfte simulierte (force-feedback steering wheel). Der Lenkwinkel wurde durch ein Potentiometer gemessen, die Spannung wurde digitalisiert (CerealBox® LV824-G, BG Systems, Inc., Palo Alto, CA, USA) und über ein RS-232 Protokoll zu der seriellen Schnittstelle des Simulationsrechners zur Neuberechnung der Fahrerposition weitergeleitet. Die Latenz zwischen Lenkradbewegung und Bildaktualisierung lag typischerweise zwischen 1-2 Aktualisierungszyklen.

Der Auslenkung des Lenkrades wirkte der Gleichstrommotor entgegen. Der Gleichstrommotor erzeugte ein Drehmoment auf das Lenkrad, das bis zu einem Lenkradausschlag von ca. 45° zur Lenkraddrehung proportional war. Durch diese Proportionalität konnte der Fahrer die gegenwärtige Stel-

lung des Lenkrades auch haptisch erfahren. Die im realen Verkehr tatsächlich auftretenden Rückstellkräfte wurden in einer früheren Arbeit empirisch ermittelt (Chatziastros, 1997). Gemäß diesen Daten wurde der Lenkradgradient (Drehmoment/Lenkradwinkel) auf ca. 4.5 Nm/rad gesetzt, einem Wert, der in einem Mittelklasse-Fahrzeug bei Fahrgeschwindigkeiten von 60-80 km/h vorliegt. Bei einem Lenkraddurchmesser von 38 cm und einem Lenkausschlag von 45° konnte die maximale Rückstellkraft von 18.5 N erreicht werden.

Wurde die Computermouse als Steuerinstrument benutzt, entsprach die Art der Steuerung nicht der des Lenkrads. Hier bestimmte die aktuelle Abweichung der Mouse von der Bildschirmmitte (Mouseposition) die seitliche Geschwindigkeit. Die laterale Position in der Fahrsimulation entsprach dann einer einfachen Integration der Mouseposition über die Zeit. Die Mousesteuerung kann deshalb als Kontrollinstrument 1. Ordnung betrachtet werden. Die Lenkradsteuerung wird dagegen als ein Kontrollinstrument 2. Ordnung angesehen. Wäre die Beziehung zwischen Mouseposition und lateraler Position ebenfalls 2. Ordnung gewesen, dann hätte die Mouseposition der Drehrate der simulierten Bewegung bzw. der lateralen Beschleunigung entsprechen müssen.

ANHANG 2

NACHTRÄGE ZUM

BIENTUNNELEXPERIMENT

In diesem Anhang werden einige mathematischen Erläuterung zu Kapitel 2 und 3 nachgetragen. In diesen beiden Kapiteln wurden Experimente vorgestellt, in denen eine Bewegung des Beobachters durch eine Bewegung der Seitenwände eines Korridors simuliert wurde. Es wird hier vorgestellt, welche Größen zur Winkelgeschwindigkeit beitragen, welches Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten zwischen linker und rechter Seitenwand in Abhängigkeit von der Position im Korridor erreicht wird und wie sich die Winkelgeschwindigkeit bei gleichzeitig lateraler Bewegung des Beobachters verändert.

Winkelgeschwindigkeiten ohne laterale Bewegung im Korridor

Die Winkelgeschwindigkeit ω eines Raumpunktes P ist eine Funktion der Geschwindigkeit v , des Winkels θ zwischen Bewegungsrichtung und Raumpunkt P und des kleinsten „Passierabstandes“ x , wenn die Bewegung mit gleicher Richtung fortgesetzt wird (siehe Abbildung A2.1.). Der Geschwindigkeitsvektor v kann dabei am Punkt P ansetzen (Raumpunkt bewegt sich) oder äquivalent am Beobachter O (Beobachter bewegt sich) mit negativen Vorzeichen.

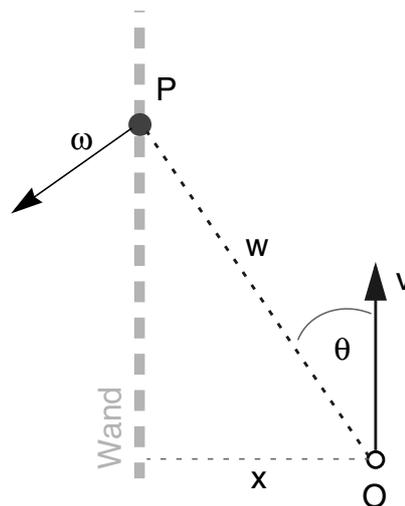


Abbildung A2.1. Größen zur Berechnung der Winkelgeschwindigkeit. Beobachter O bewegt sich mit Geschwindigkeit v parallel zu einer Wand im Abstand x . Ein Punkt P an der Wand hat dann die Winkelgeschwindigkeit ω .

Die Winkelgeschwindigkeit ω berechnet sich nach:

$$\omega = (\sin\theta)^2 \cdot \frac{v}{x}$$

Alternativ dazu, lautet die Gleichung in Abhängigkeit von der Entfernung w des Punktes P :

$$\omega = \sin\theta \cdot \frac{v}{w}$$

Punkt des Geschwindigkeitsabgleichs

Bewegt sich eine Seite des Korridors mit Geschwindigkeit v_1 und die gegenüberliegende Seite mit doppelter Geschwindigkeit v_2 , wird ein Geschwindigkeitsabgleich homologer Stellen (gleiche Exzentrizität) dann erreicht, wenn der Abstand zur schnelleren Seite x_2 doppelt so groß ist als der Abstand zur langsameren Seite x_1 . Die folgende Abbildung veranschaulicht dies geometrisch: Die Winkelgeschwindigkeit beider Seiten ist dann gleich, wenn in einem bestimmten Zeitintervall die entsprechenden Punkte auf beiden Seiten den gleichen Winkel θ durchschreiten.

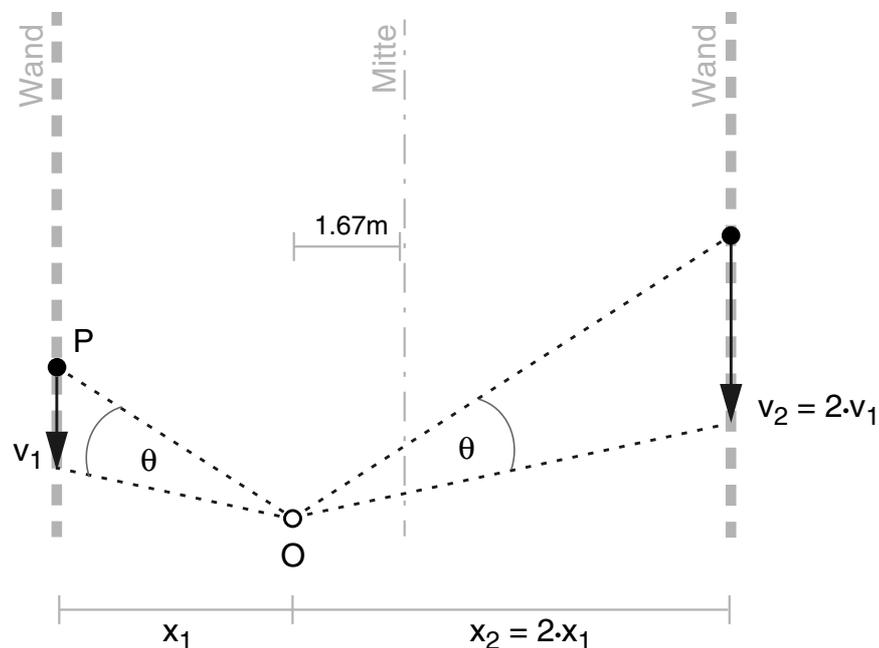


Abbildung A2.2. Punkt des Geschwindigkeitsabgleichs, wenn sich die Seitenwände eines Korridors mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen.

Beispiel: Bei einem 10 m breiten Korridor hat der Punkt, an dem ein Geschwindigkeitsabgleich stattfindet, einen Abstand von 1.67 m zur Mitte des Korridors, in Richtung der langsameren Seite. Wird beispielsweise nur 0.83 m in diese Richtung korrigiert, wird $(0.83/1.67) \cdot 100\% = 50\%$ der benötigten lateralen Veränderung bis zum Geschwindigkeitsabgleich erreicht.

Der Position des Punktes, an dem ein Ortsfrequenzabgleich stattfindet, folgt den gleichen geometrischen Überlegungen: Ist die Ortsfrequenz einer Seite doppelt so hoch als auf der anderen Seite, muss der Abstand zu den beiden Seiten dem Verhältnis 1:2 entsprechen.

Berechnung über die Geschwindigkeitsverhältnisse

Die tatsächlichen Verhältnisse werden allerdings ein wenig verzerrt, wenn eine Ermittlung dessen, wieweit die ungleichen Seitenwandgeschwindigkeit abgeglichen wurden, unmittelbar über die laterale Abweichung von der Mitte berechnet wird. Ein Beispiel soll dies erläutern: Betrachten wir den Fall, dass sich die Wandgeschwindigkeiten um Faktor 2 unterscheiden, und das o.g. Beispiel, dass eine laterale Versetzung von 0.83 m beobachtet wurde. An dieser Stelle im Korridor erscheint die schnellere Seite noch 1.43 mal so schnell als die langsamere. Bezeichnet man eine Position in der Mitte des Korridors als eine Korrektur von 0%, während ein vollständiger Geschwindigkeitsabgleich eine Korrektur von 100% darstellen soll, entspricht ein Geschwindigkeitsverhältnis von 1.43 einem Geschwindigkeitsabgleich von $(2-1.43) \cdot 100\% = 57\%$, also etwas mehr als die 50%, die sich aus der reinen lateralen Veränderung ergeben.

Der relative Anteil des Geschwindigkeitsabgleichs (%GA) lässt sich dann auf folgende Weise berechnen:

$$\%GA = \left(1 - \frac{x_1/x_2 - c}{1 - c} \right) \cdot 100\%$$

Hierbei sind x_1 und x_2 die jeweiligen Abstände zu den Seitenwänden, wobei $x_1 < x_2$. Die Variable c bezeichnet das Verhältnis der objektiven Geschwindigkeiten der Seitenwände (v_1/v_2), in diesem Fall ist $c = 0.5$.

Analog zum relativen Anteil des Geschwindigkeitsabgleich kann auch der relative Anteil des Ortsfrequenzabgleichs berechnet werden (Wie weit wurde die Streifenbreite zwischen beiden Seiten abgeglichen?). Dazu muss in o.g. Formel für c das Verhältnis der Ortsfrequenzen (OF_2/OF_1) eingesetzt werden.

Winkelgeschwindigkeiten mit lateraler Bewegung im Korridor

Wie verändert sich nun die Winkelgeschwindigkeit zwischen zwei homologen Stellen (gleiche Exzentrizität) im Korridor, wenn sich eine Seitenwand mit doppelter longitudinaler (vorwärtsgerichteter) Geschwindigkeit bewegt, und noch zusätzlich eine laterale (seitliche) Geschwindigkeit des Beobachters zu einer Seitenwand hinzukommt? Im unteren Schaubild (Abbildung A2.3.) betrachtet ein Beobachter O einen Punkt P , der in einer Entfernung w vom Beobachter liegt, und mit einer absoluten Geschwindigkeit v_{long} entlang der linken Seitenwand bewegt wird. Dabei vollzieht der Beobachter eine Bewegung nach rechts, mit einer seitlichen Geschwindigkeit v_{lat} zur rechten Seitenwand, welche sich mit Geschwindigkeit $2 \cdot v_{long}$ bewegt.

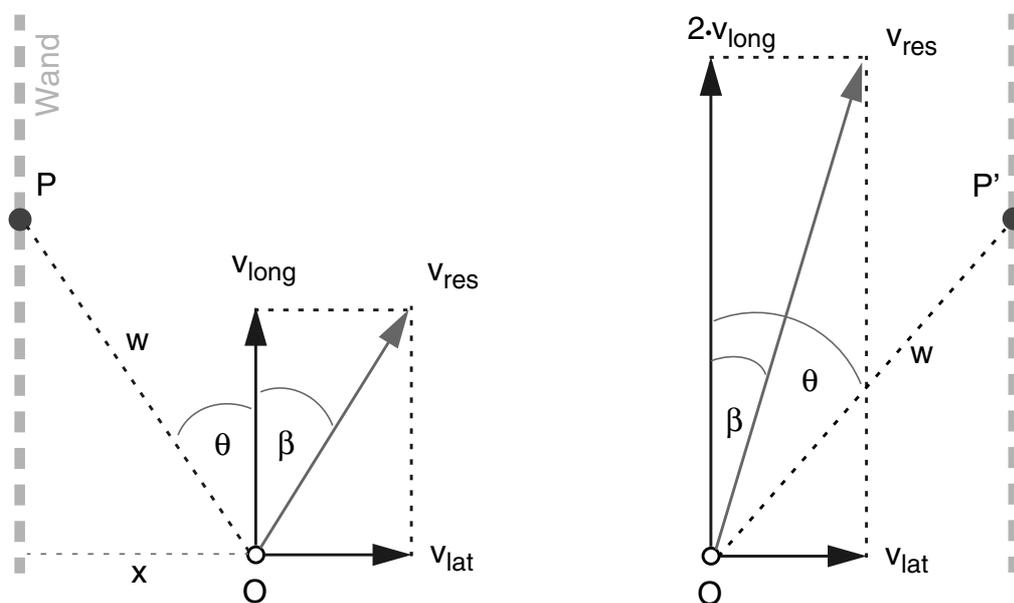


Abbildung A2.3. Resultierende Winkelgeschwindigkeiten im Korridor, wenn sich ein Beobachter zusätzlich lateral bewegt.

Statt am Punkt P setzen die Geschwindigkeitsvektoren zur geometrischen Vereinfachung am Beobachter an. Der Beobachter soll in der Mitte des Korridors sein und hat zu beiden Seitenwänden den gleichen Abstand x . Die Richtung der seitlichen Bewegung soll hierbei senkrecht zur Bewegungsrichtung des Punktes P sein.

Aufgrund der lateralen Geschwindigkeit wird die Relativbewegung von Beobachter zum Punkt P nun durch einen neuen Vektor mit Betrag v_{res} gekennzeichnet. Die Richtung des neuen Geschwindigkeitsvektors verändert sich zum Winkel $\theta + \beta$ für die linke bzw. $\beta - \theta$ für die rechte Seite. Der

Abstand w verändert sich durch die laterale Bewegung nicht. Die Winkelgeschwindigkeit des Punkts P auf der linken Seitenwand ist dann:

$$\omega = \sin\left(\theta + \operatorname{atan}\frac{v_{lat}}{v_{long}}\right) \cdot \frac{\sqrt{v_{lat}^2 + v_{long}^2}}{w}$$

Die Winkelgeschwindigkeit eines homologen Punktes P' auf der rechten Seite, welche sich mit doppelter Geschwindigkeit bewegt, beträgt:

$$\omega = \sin\left(\theta - \operatorname{atan}\frac{v_{lat}}{2v_{long}}\right) \cdot \frac{\sqrt{v_{lat}^2 + (2v_{long})^2}}{w}$$

Die Berechnungen in der Diskussion des Abschnitts „Bientunnel - niedrige Geschwindigkeiten und Sinusmuster“ (Kap. 2) basieren auf diesen Formeln.

ANHANG 3

BLICKRICHTUNGSMESSUNG

Es werden hier einige Details zu den verwendeten Geräten zur Blickrichtungs- und Kopforientierungsmessung und den eingesetzten Methoden erläutert. Die Ergebnisse wurden in Kapitel 6 vorgestellt.

Eyetracker

Die Augenposition wurde mit einem Infrarot-Messgerät IRIS (Abbildung A3.1.) der Firma Skalar gemessen (Skalar Medical, Delft, Holland). Das Verfahren beruht auf der Reflexion von Infrarotlicht am Augenweiß und an der dunkleren Iris des Auges. An einem Helm befestigt sind infrarot-emitierende Dioden über dem Auge angebracht, während unterhalb des Auges infrarot-empfindliche Phototransistoren das reflektierte Licht von der Sklera und Iris messen. Die Phototransistoren auf jeweils der nasalen und temporalen Seite des Auges wandeln das reflektierte Licht in zwei Spannungen um, die in einem Verstärker voneinander abgezogen und verstärkt werden. Die resultierende Spannung ist dann proportional der Augenstellung. Der Messbereich liegt bei $\pm 30^\circ$ in horizontaler und $\pm 20^\circ$ in vertikaler Richtung. Eine Linearität der Spannung zur Augenstellung (3% Quadratwurzelfehler des Sollwertes) ist nach Angaben des Herstellers in einem Bereich von $\pm 25^\circ$ horizontal und $\pm 16^\circ$ vertikal gegeben.



Abbildung A3.1. Kopfbasiertes Infrarot-Blickrichtungsmessgerät bestehend aus einem leichten Sensorhelm (links) und einer Verstärkereinheit (rechts).

Das Messgerät besitzt zwei Sensoren. Damit wurde vom rechten Auge die horizontale Stellung und vom linken Auge die vertikale Stellung gemessen. Die gemessene Spannung wurde digitalisiert (CerealBox® LV824-G, BG Systems, Inc., Palo Alto, CA, USA) und über ein RS-232 Protokoll zu der seriellen Schnittstelle des Simulationsrechners geleitet.

Kalibrierung

Die Kalibrierung der Blickrichtungsmessung wurde mit einer eigens dafür programmierten Routine vorgenommen. Den Probanden wurde der Sensorhelm aufgezogen, und die Position der Infrarot-Dioden bezüglich Augenabstand und Augenhöhe justiert. Anschließend mussten die Probanden Kalibrierungspunkte auf der Leinwand fixieren, während der Kopf in einer Kinnhalterung lag, und so genau wie möglich zur Leinwandmitte ausgerichtet war.

Nacheinander sollten 25 Kalibrierungspunkte auf einer zweidimensionalen 5x5-Matrix binokular fixiert werden, die ein visuelles Feld von 20° horizontal und 10° einnahm (siehe Abbildung A3.2.a). Zu jedem Zeitpunkt war nur ein Kalibrierungspunkt sichtbar, der als kleine weiße Scheibe mit einem zentralen schwarzen Punkt vor einem grün-texturierten Hintergrund dargestellt wurde. Als Kriterium für eine genaue Fixation wurde für die horizontale Richtung eine Standardabweichung von höchstens 1° über einen Zeitraum von einer Sekunde definiert. Aufgrund der niedrigeren Sensitivität des Messgerätes in vertikaler Richtung (in vertikaler Richtung resultieren kleinere Reflexionsunterschiede u.A. aufgrund des kleinen Lidabstands) wurde in dieser Richtung eine Standardabweichung von höchstens 2° gefordert. Wenn beide Kriterien erfüllt wurden, wurde der Mittelwert aus dem letzten 1-Sekunden-Intervall registriert und ein neuer Kalibrierungspunkt angeboten. So sollte zumindest rechnerisch eine Genauigkeit der registrierten Werte von ca. 1/8tel Grad für die Horizontale und ca. 1/4tel Grad für die Vertikale erreicht werden.

Headtracker

Da die Augenstellung mit dieser Apparatur nur relativ zum Kopf gemessen wurde, musste die Kopforientierung erfasst werden, um die Blickrichtung im Raum berechnen zu können. Verwendung fand ein magnetischer Positionssensor (Polhemus FASTRACK, Polhemus Inc., Colchester, VT, USA), der aus einer Magnetquelle und einem kleinen Sensor besteht. Die Magnetquelle steht in der Nähe der Person und produziert durch sinusoidale Wechselspannung ein Magnetfeld. Der kleine Sensor beinhaltet eine kleine Spule und wird am Kopf der Versuchsperson befestigt. Das Magnetfeld induziert in der Spule einen elektrischen Strom, der von der Stärke und Orientierung des Magnetfelds an diesem Ort abhängt, und über den die Position und die Orientierung des Kopfs relativ zur Magnetquelle bestimmt werden kann.

Die Kopfrichtung wurde nicht an einer externen Referenz kalibriert. Während der Kalibrierung des Augensignals waren die Probanden lediglich

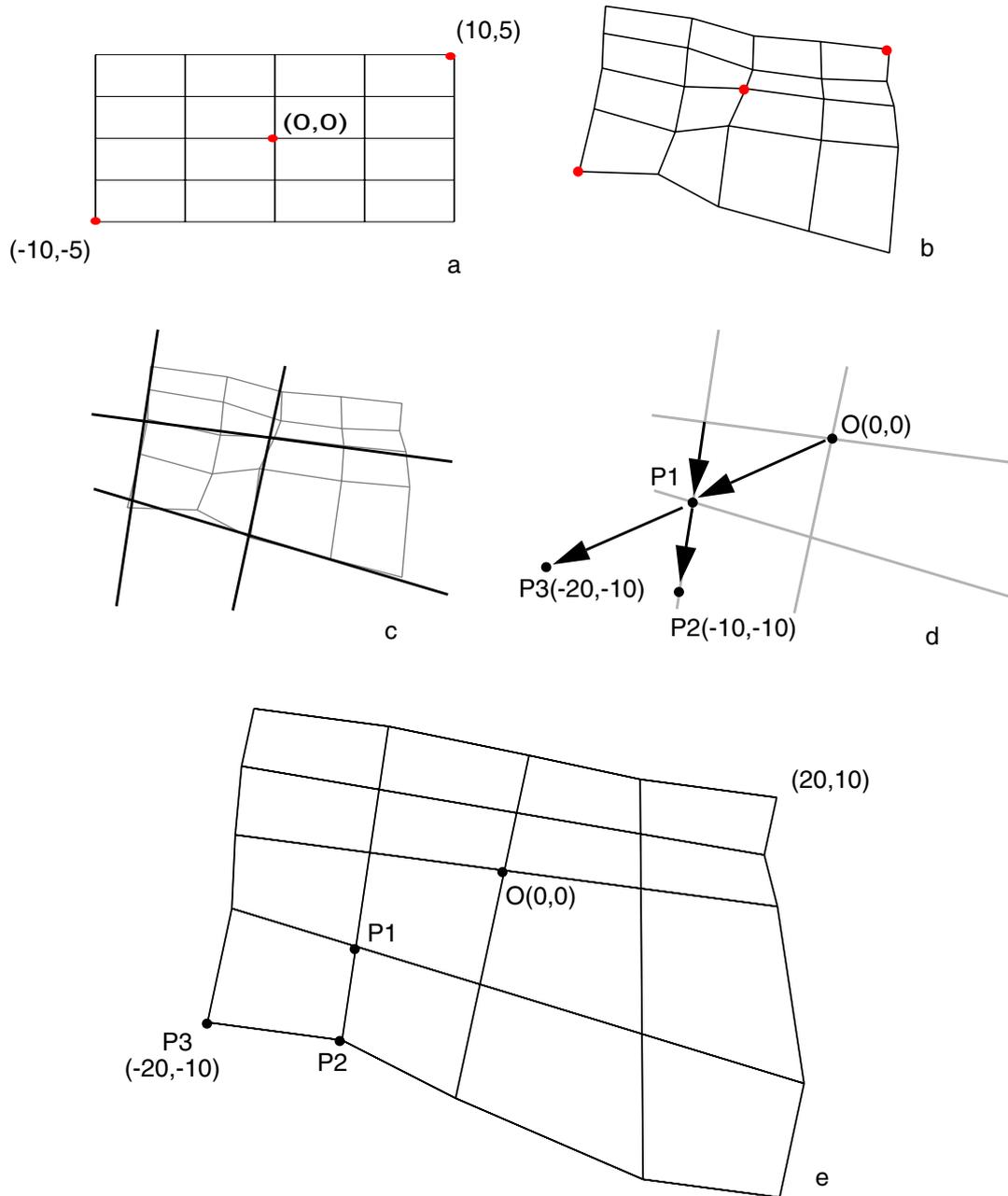


Abbildung A3.2. Aufblähung der Kalibrierungsmatrix. a: 25 Kalibrierungspunkte werden nacheinander fixiert. b: Ursprüngliche Fixationsmatrix eines Probanden. c: Berechnung der Regressionsgeraden mit Punkten jeweils gleicher Exzentrizität. Dargestellt sind nur die Regressionsgeraden bei 0° und -10° horizontal und 0° und -5° vertikal. d: Berechnung der neuen Punkte außerhalb der ursprünglichen Fixationsmatrix, entlang der Regressionsgeraden und diagonal nach außen. d: Erweiterte Fixationsmatrix mit den Größe 40° horizontal und 20° vertikal.

instruiert, den Kopf so genau wie möglich zur Leinwand auszurichten. Deshalb sind die Absolutwerte der Kopfpositionsdaten nicht aussagekräftig. Relative Kopfdrehungen, wie sie im Experiment auftraten, können allerdings uneingeschränkt interpretiert werden.

Die Kopforientierung und die Augenstellung wurden 72 mal in der Sekunde aufgezeichnet, um später in einer off-line Analyse die Blickrichtung im Raum zu ermitteln.

Offline Berechnungen

Die Kalibrierungsmatrix jeder Versuchsperson wurde weiterverarbeitet, um einen größeren Gültigkeitsbereich zu erhalten. Die ursprüngliche Matrix hatte den Nachteil, dass bei Blickabweichung über 10° bzw. bei kombinierten Kopf- und Augenrotationen von über 10° , die gemessene Augenstellung nicht auf Raumkoordinaten zurückgeführt werden konnte. Die ursprüngliche Matrix wurde auf eine vierfache Fläche sozusagen „aufgebläht“, um auch exzentrischere Blick- und Kopfrichtungen in Leinwandkoordinaten angeben zu können. Aufgrund der Linearität des Messapparats in diesem Bereich und dem relativ strikten Fixationskriterium, sollten nur geringe Fehler durch die Extrapolation zu erwarten sein. Für die „Aufblähung“ wurden auf die ursprüngliche Fixationsmatrix mehrere Regressionen gerechnet. Dadurch wurden 9 äußere Punkte der ursprünglichen Matrix korrigiert und 16 neue, extrapolierte Punkte berechnet. In Abbildung A3.2.a-e ist das Verfahren schematisch dargestellt. Das Resultat war eine erweiterte Fixationsmatrix, die einen Bereich von 40° horizontal und 20° vertikal abdeckte.

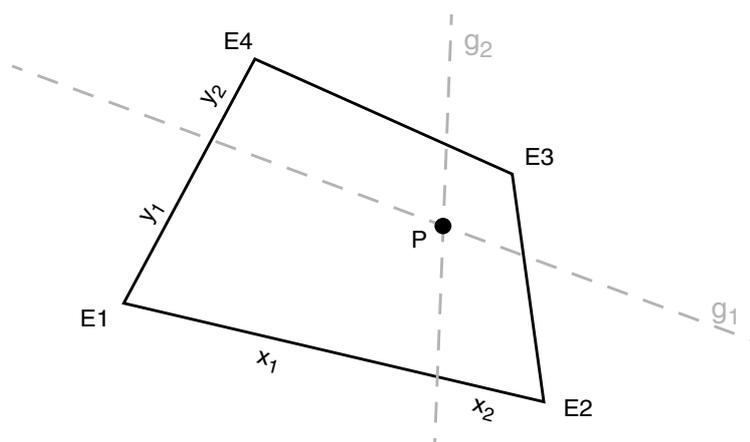


Abbildung A3.3. Interpolation innerhalb bekannter Eckpunkte E1-E4 über Teilverhältnisse.

Auf Basis dieser 5x5-Matrix wurde die gespeicherte Spannung in einen Blickwinkel zur Leinwandmitte in Grad zurück gerechnet. Im ersten Schritt wurde bestimmt, ob der gegebene Punkt innerhalb der Matrix ($\pm 20^\circ$ hor., $\pm 10^\circ$ vert.) lag, und wenn ja, in welchem der 16 Felder. Dazu wurde folgende algebraische Tatsache ausgenutzt: Liegt ein Punkt innerhalb eines Vierecks, dann ist die Determinante einer Matrix, die aus den homologen Koordinaten dieses Punktes und zweier, gegen die Uhrzeigerrichtung benachbarter Eckpunkte des Vierecks besteht, immer positiv. Im zweiten Schritt musste der Winkel innerhalb den bekannten Werten der Eckpunkte (Kalibrierungspunkte) interpoliert werden. Dazu wurde nach den zwei Geraden g_1 und g_2 gesucht, die durch den Punkt P und durch den Schnittpunkt der jeweils zwei gegenüberliegenden Seitengeraden gehen (siehe Abbildung A3.3.). Aus dem Verhältnis der Teilstrecken x_1 und x_2 (bzw. y_1 und y_2) wurde dann der Blickwinkel in Kopfkoordinaten bestimmt und anschließend mit der Kopforientierung im Raum korrigiert.

LITERATUR

- Aglioti, S., DeSouza, J. F. X., & Goodale, M. A. (1995). Size-contrast illusions deceive the eye but not the hand. *Current Biology*, 5(6), 679-685.
- Aloimonos, Y. (1993). *Active Perception*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Andersen, G. J., Cisneros, J., Atchley, P., & Saidpour, A. (1999). Speed, size, and edge-rate information for the detection of collision events. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(1), 256-269.
- Atchley, P., & Andersen, G. J. (1998). The effect of age, retinal eccentricity, and speed on the detection of optic flow components. *Psychology and Aging*, 13(2), 297-308.
- Atchley, P., & Andersen, G. J. (1999). The discrimination of heading from optic flow is not retinally invariant. *Perception & Psychophysics*, 61(3), 387-396.
- Ballard, D. H., Hayhoe, M., Li, F., & Whitehead, S. D. (1992). Hand-eye coordination during sequential tasks. *Phil. Trans. of the R. Soc. of London B*, 337, 331-338.
- Beall, A. C., & Loomis, J. M. (1996). Visual control of steering without course information. *Perception*, 25, 481-494.
- Bertenthal, B. I., & Bai, D. L. (1989). Infants' sensitivity to optic flow for controlling posture. *Developmental Psychology*, 25(6), 936-945.
- Berthoz, A., Pavard, B., & Young, L. R. (1975). Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection). Basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental Brain Research*, 23, 471-489.
- Beusmans, J. (1995). *Center of outflow is not used to control locomotion* (Technical Report CBR TR 95-5). Cambridge, MA: Cambridge Basic Research.
- Blakemore, M. R., & Snowden, R. J. (1999). The effect of contrast upon perceived speed: A general phenomenon? *Perception*, 28, 33-48.
- Blakemore, M. R., & Snowden, R. J. (2000). Textured backgrounds alter perceived speed. *Vision Research*, 40(6), 629-638.
- Bondurant, R., & Blakemore, J. (1998). *Bob Bondurant on high performance driving*. Osceola, WI: Motorbooks International.
- Bonnet, C. (1984). Discrimination of velocities and mechanisms of motion perception. *Perception*, 13, 275-282.
- Bortz, J. (1999). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. (5 ed.). Berlin: Springer.

- Brandt, T., Dichgans, J., & Büchele, W. (1974). Motion habituation - Inverted self-motion perception and optokinetic after-nystagmus. *Experimental Brain Research*, 21(4), 337-352.
- Brandt, T., Dichgans, J., & Koenig, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, 16, 476-491.
- Brecher, G. A., Brecher, M. H., Kommerell, G., Sauter, F. A., & Sellerbeck, J. (1972). Relation of optical and labyrinthine orientation. *Optica Acta*, 19(5), 467-471.
- Bremmer, F., Duhamel, J.-R., Ben Hamed, S., & Graf, W. (2000). Stages of self-motion processing in primate posterior parietal cortex. In M. Lappe (Ed.), *Neuronal processing of optic flow* (pp. 173-198). London: Academic Press.
- Bremmer, F., & Lappe, M. (1999). The use of optical velocities for distance discrimination and reproduction during visually simulated self-motion. *Experimental Brain Research*, 127, 33-42.
- Bridgeman, B., & Graziano, J. A. (1989). Effect of context and efference copy on visual straight ahead. *Vision Research*, 29(12), 1729-1736.
- Bridgeman, B., Kirch, M., & Sperling, A. (1981). Segregation of cognitive and motor aspects of visual function using induced motion. *Perception & Psychophysics*, 29(4), 336-342.
- Bridgeman, B., Peery, S., & Anand, S. (1997). Interaction of cognitive and sensorimotor maps of visual space. *Perception & Psychophysics*, 59(3), 456-469.
- Brosigole, L. (1968). An analysis of induced motion. *Acta Psychologica*, 28, 1-44.
- Brouwer, A.-N., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2002). Hitting moving objects: Is target speed used in guiding the hand? *Experimental Brain Research*, 143, 198-211.
- Brown, J. F. (1931). The visual perception of velocity. *Psychologische Forschung*, 14, 199-232.
- Bruell, J. H., & Albee, G. W. (1955). Notes toward a motor theory of visual egocentric localization. *Psychological Review*, 62(5), 391-400.
- Calvert, E. S. (1954). Visual judgments in motion. *Journal of the Institute of Navigation, London*, 7, 233-251.
- Campbell, F. W., & Maffei, L. (1981). The influence of spatial frequency and contrast on the perception of moving patterns. *Vision Research*, 21, 713-721.
- Campbell, F. W., & Robson, J. G. (1968). Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *Journal of Physiology*, 197, 551-566.
- Cavallo, V., & Laurent, M. (1988). Visual information and skill level in time-to-collision estimation. *Perception*, 17, 623-632.

- Chapman, P. R., & Underwood, G. (1998). Visual search in driving situations: Danger and experience. *Perception, 27*, 951-964.
- Chatziastros, A. (1997). *Über die Bedeutung visueller Reize bei der Positionskontrolle eines Fahrzeugs in einer simulierten Umwelt*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen.
- Chatziastros, A., Cunningham, D. W., & Bühlhoff, H. H. (2000). Can we be forced off the road by the visual motion of snowflakes? Immediate and longer-term responses to visual perturbations. *Perception, 29*(suppl.), 118.
- Chaudhuri, A. (1990). A motion illusion generated by afternystagmus suppression. *Neuroscience Letters, 118*, 91-95.
- Chaudhuri, A. (1991). Eye movements and the motion aftereffect: Alternatives to the induced motion hypothesis. *Vision Research, 31*(9), 1639-1645.
- Chen, Y., Bedell, H. E., & Frishman, L. J. (1998). The precision of velocity discrimination across spatial frequency. *Perception & Psychophysics, 60*(8), 1329-1336.
- Clifford, C. W. G., & Wenderoth, P. (1999). Adaptation to temporal modulation can enhance differential speed sensitivity. *Vision Research, 39*, 4324-4332.
- Cohen, B., Matsuo, V., & Raphan, T. (1977). Quantitative analysis of the velocity characteristics of optokinetic nystagmus and optokinetic afternystagmus. *Journal of Physiology, 270*, 321-344.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (2 ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Corneil, B. D., Hing, B. D., Bautista, D. V., & Munoz, D. P. (1999). Human eye-head shifts in a distractor task. I. Truncated gaze shifts. *Journal of Neurophysiology, 82*, 1390-1405.
- Croner, L. J., & Albright, T. D. (1999). Seeing the big picture: Intergration of image cues in the primate visual system. *Neuron, 24*, 777-789.
- Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1993). Perceiving heading with different retinal locations and types of optic flow. *Perception & Psychophysics, 53*, 325-337.
- Cutting, J. E., Wang, R. F., Flückinger, M., & Baumberger, B. (1999). Human heading judgements and object-based motion information. *Vision Research, 39*, 1079-1105.
- Cutting, J. E. (1986). *Perception with an eye for motion*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cutting, J. E., Alliprandini, P. M. Z., & Wang, R. F. (2000). Seeking one's heading through eye movements. *Psychonomic Bulletin & Review, 7*(3), 490-498.
- Cutting, J. E., & Millard, R. T. (1984). Three gradients and perception of flat and curved surfaces. *Journal of Experimental Psychology, 113*(2), 198-216.

- Cutting, J. E., Readinger, W. O., & Wang, R. F. (in Druck). Walking, looking to the side, and taking curved paths. *Perception & Psychophysics*.
- Cutting, J. E., Springer, K., Braren, P. A., & Johnson, S. H. (1992). Wayfinding on foot from information in retinal, not optic, flow. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121(1), 41-72.
- Cutting, J. E., Vishton, P. M., Flückinger, M., & Baumberger, B. (1997). Heading and path information from retinal flow in naturalistic environments. *Perception & Psychophysics*, 59(3), 426-441.
- de Graaf, B., Wertheim, A. H., Bles, W., & Kremers, J. (1990). Angular velocity, not temporal frequency determines circularvection. *Vision Research*, 30(4), 637-646.
- De Valois, R. L., & De Valois, K. K. (1988). *Spatial Vision*. Oxford: Oxford University Press.
- Denton, G. G. (1980). The influence of visual pattern on perceived speed. *Perception*, 9, 393-402.
- Dichgans, J., & Brandt, T. (1978). Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In R. Held, H. W. Leibowitz, & H.-L. Teuber (Eds.), *Handbook of Sensory Physiology. Vol. VIII: Perception* (pp. 754-804). Berlin: Springer.
- Diener, H. C., Wist, E. R., Dichgans, J., & Brandt, T. (1976). The spatial frequency effect on perceived velocity. *Vision Research*, 16, 169-176.
- Dishart, D. C., & Land, M. F. (1998). The development of the eye movement strategies of learner drivers. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception* (pp. 419-429). Amsterdam: Elsevier.
- Distler, H. K. (2000). *Wahrnehmung und virtuelle Welten*. Unveröffentlichte Dissertation, Max-Planck Institut für biologische Kybernetik, Tübingen.
- Distler, H. K., Gegenfurtner, K. R., van Veen, H. A. H. C., & Hawken, M. J. (2000). Velocity constancy in a virtual reality environment. *Perception*, 29, 1423-1435.
- Doherty, M. J., & Anderson, J. R. (2001). People don't keep their heads still when looking to one side, and other people can tell. *Perception*, 30, 765-767.
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20(6), 691-707.
- Duchon, A. P. (1999). *Visual strategies for the control of locomotion*. , Brown University, Providence, RI.
- Duchon, A. P., & Warren, W. H. (2002). A visual equalization strategy for locomotor control: Of honeybees, robots, and humans. *Psychological Science*, 13(3), 272-278.
- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1993). An illusory transformation of optic flow fields. *Vision Research*, 33(11), 1481-1490.

- Duffy, C. J., & Wurtz, R. H. (1995). Mechanisms of the illusory transformation of optic flow fields. *Vision Research*, 35(7), 985.
- Dunker, K. (1929). Über induzierte Bewegung. *Psychologische Forschung*, 12, 180-259.
- Dyre, B. P., & Andersen, G. J. (1997). Image velocity magnitudes and perception of heading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(2), 546-565.
- Dyre, B. P., Kludt, K. T., & Fournier, L. R. (2002). The effects of color coding and attentional selection on perception of heading with transparent optical flow. *Journal of Vision*, 2(?), 513a.
- Egelhaaf, M., & Borst, A. (1992). Is there a separate control system mediating a „centering response" in honeybees? *Naturwissenschaften*, 79, 221-223.
- Egelhaaf, M., Kern, R., & Warzecha, A.-K. (1998). Ein Blick ins Cockpit der Fliege: Wie steuern neuronale Schaltkreise visuelles Orientierungsverhalten. *Neuroforum*, 2, 204-212.
- Euler, T., Detwiler, P. B., & Denk, W. (2002). Directionally selective calcium signals in dendrites of starburst amacrine cells. *Nature*, 418, 845-852.
- Flach, J. M., Hagen, B. A., & Larish, J. F. (1992). Active regulation of altitude as a function of optical texture. *Perception & Psychophysics*, 51(6), 557-568.
- Flach, J. M., Warren, R., Garness, S. A., Kelly, L., & Stanard, T. (1997). Perception and control of altitude: Splay and depression angles. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(6), 1764-1782.
- Flückinger, M., & Baumberger, B. (1988). The perception of an optical flow projected on the ground surface. *Perception*, 17, 633-645.
- Franz, V. H., Fahle, M., Bühlhoff, H. H., & Gegenfurtner, K. R. (2001). Effects of visual illusions on grasping. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(5), 1124-1144.
- Franz, V. H., Gegenfurtner, K. R., Bühlhoff, H. H., & Fahle, M. (2000). Grasping visual illusions: No evidence for a dissociation between perception and action. *Psychological Science*, 11(1), 20-25.
- Gegenfurtner, K. R., & Hawken, M. J. (1996). Perceived velocity of luminance, chromatic and non-fourier stimuli: Influence of contrast and temporal frequency. *Vision Research*, 36, 1281-1290.
- Gegenfurtner, K. R., Mayser, H., & Sharpe, L. T. (1999). Seeing movement in the dark. *Nature*, 398, 475-476.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.

- Gibson, J. J. (1982). *Wahrnehmung und Umwelt: Der ökologische Ansatz in der visuellen Wahrnehmung*. München: Urban & Schwarzenberg.
- Gibson, J. J., College, S., & Crooks, L. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*, *LI*(3), 453-471.
- Glover, S., & Dixon, P. (2001). Motor adaptation to an optical illusion. *Experimental Brain Research*, *137*, 254-258.
- Godthelp, H. (1986). Vehicle control during curve driving. *Human Factors*, *28*(2), 211-221.
- Godthelp, H., & Käßler, W.-D. (1988). Effects of vehicle handling characteristics on driving strategy. *Human Factors*, *30*(2), 219-229.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors*, *26*(3), 257-268.
- Gogel, W. C. (1974). Relative motion and the adjacency principle. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *26*, 425-437.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, *15*, 97-112.
- Götz, K. G. (1964). Optomotorische Untersuchungen des visuellen Systems einiger Augenmutanten der Fruchtfliege *Drosophila*. *Kybernetik*, *2*(2), 77-92.
- Graham, N., & Nachmias, J. (1971). Detection of grating pattern containing two spatial frequencies: A comparison of single-channel and multi-channel models. *Vision Research*, *11*, 251-256.
- Grasso, R., Prevost, P., Ivanenko, Y. P., & Berthoz, A. (1998). Eye-head coordination for the steering of locomotion in humans: An anticipatory synergy. *Neuroscience Letters*, *253*, 115-118.
- Gray, R., & Regan, D. (1998). Accuracy of estimating time to collision using binocular and monocular information. *Vision Res.*, *38*(4), 499-512.
- Grigo, A., & Lappe, M. (1998). Interaction of stereo vision and optic flow processing revealed by an illusory stimulus. *Vision Research*, *38*(2), 281-290.
- Hammett, S. T., Thompson, P. G., & Bedingham, S. (2000). The dynamics of velocity adaptation. *Current Biology*, *10*, 1123-1126.
- Harris, J. M., & Rogers, B. J. (1999). Going against the flow. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*(12), 449-450.
- Harris, M. G., & Carre, G. (2001). Is optic flow used to guide walking while wearing a displacing prism? *Perception*, *30*, 811-818.
- Hassenstein, B., & Reichardt, W. (1956). Systemtheoretische Analyse der Zeit-, Reihenfolgen- und Vorzeichenauswertung bei der Bewegungserzeption des Rüsselkäfers *Chlorophanus*. *Zeitschrift für Naturforschung*, *11*(9/10), 513-524.

- Hawken, M. J., Gegenfurtner, K. R., & Tang, C. (1994). Contrast dependence of colour and luminance motion mechanisms in human vision. *Nature*, 367, 268-270.
- Heckmann, T., & Post, R. B. (1988). Induced motion and optokinetic afternystagmus: parallel response dynamics with prolonged stimulation. *Vision Research*, 28(6), 681-94.
- Helander, M. (1978). Drivers' steering behavior during traffic events: A case of perceptual tropism? *Human Factors*, 20, 681-690.
- Helmholtz, H. v. (1910). *Handbuch der physiologischen Optik. Band 3: Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen*. Hamburg: Voss.
- Hershenson, M., & Samuels, S. M. (1999). An airplane illusion: Apparent velocity determined by apparent distance. *Perception*, 28, 433-436.
- Hildreth, E. C. (1992). Recovering heading for visually-guided navigation. *Vision Research*, 32(6), 1177-1192.
- Hildreth, E. C., Beusmans, J. M. H., Boer, E. R., & Royden, C. S. (2000). From vision to action: Experiments and models of steering control during driving. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(3), 1106-1132.
- Hildreth, E. C., & Royden, C. S. (1998). Computing observer motion from optical flow. In T. Watanabe (Ed.), *High-level motion processing* (pp. 269-293). London: MIT Press.
- Hoffmann, E. R. (1994). Estimation of time to vehicle arrival-effects of age on use available visual information. *Perception*, 23, 947-955.
- Hollands, M. A., Patla, A. E., & Vickers, J. N. (2002). "Look where you're going!": Gaze behaviour associated with maintaining and changing the direction of locomotion. *Experimental Brain Research*, 143, 221-230.
- Hollands, M. A., Sorensen, K. L., & Patla, A. E. (2001). Effect of head immobilization on the coordination and control of head and body reorientation and translation during steering. *Experimental Brain Research*, 140, 223-233.
- Holway, A. H., & Boring, E. G. (1941). Determinants of apparent visual size with distance variant. *American Journal of Psychology*, 54, 21-37.
- Honda, H. (2001). Visual mislocalisation induced by translational and radial background motion. *Perception*, 30, 935-944.
- Hooge, I. T. C., Beintema, J. A., & van den Berg, A. V. (1999). Visual search of the heading direction. *Experimental Brain Research*, 129, 615-628.
- Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2002). *Seeing in depth. Vol. II: Depth perception*. Toronto: I. Porteous.
- Hu, S., Davis, M. S., Klose, A. H., Zabinsky, E. M., Meux, S. P., Jadohsen, H. A., Westfall, J. M., & Gruber, M. B. (1997). Effects of spatial frequency of a vertically striped rotating drum on vection-induced motion sickness. *Aviation Space & Environmental Medicine*, 68(4), 306-311.

- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology (London)*, 160(1), 106-154.
- Huber, S. A., Franz, M. O., & Bühlhoff, H. H. (1999). On robots and flies: Modeling the visual orientation behavior of flies. *Robotics and Autonomous Systems*, 29(4), 227-242.
- Imai, T., Moore, S. T., Raphan, T., & Cohen, B. (2001). Interaction of the body, head and eyes during walking and turning. *Experimental Brain Research*, 136, 1-18.
- Johnston, A., Benton, C. P., & Morgan, M. J. (1999). Concurrent measurement of perceived speed and speed discrimination threshold using the method of single stimuli. *Vision Research*, 39, 3849-3854.
- Johnston, I. R., White, G. R., & Cumming, R. W. (1973). The role of optical expansion patterns in locomotor control. *American Journal of Psychology*, 86(2), 311-324.
- Karnath, H.-O., Sievering, D., & Fetter, M. (1994). The interactive contribution of neck muscle proprioception and vestibular stimulation to subjective "straight ahead" orientation in man. *Experimental Brain Research*, 101, 140-146.
- Kearns, M., Warren, W. H., Duchon, A. P., & Tarr, M. J. (2002). Path integration from optic flow and body senses in a homing task. *Perception*, 31, 349-374.
- Kelly, D. H. (1984). Retinal inhomogeneity. I. Spatiotemporal contrast sensitivity. *J. Opt. Soc. Am.*, 1(1), 107-113.
- Kim, N.-G., & Turvey, M. T. (1999). Eye movements and a rule for perceiving direction of heading. *Ecological Psychology*, 11(3), 233-248.
- Kirchner, W., & Srinivasan, M. V. (1989). Freely flying honeybees use image motion to estimate object distance. *Naturwissenschaften*, 76, 281-282.
- Kirschen, M. P., Kahana, M. J., Sekuler, R., & Burack, B. (2000). Optic flow helps humans learn to navigate through synthetic environments. *Perception*, 29, 801-818.
- Kirschfeld, K. (1991). An optomotor control system with automatic compensation for contrast and texture. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 246(1317), 261-268.
- Koenderink, J. J. (1986). Optic flow. *Vision Research*, 26(1), 161-180.
- Koenderink, J. J., & van Doorn, A. J. (1979). Spatiotemporal contrast detection threshold surface is bimodal. *Optics Letters*, 4(1), 32-34.
- Koenderink, J. J., & van Doorn, A. J. (1987). Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*, 56, 247-254.
- Land, M. F. (1992). Predictable eye-head coordination during driving. *Nature*, 359, 318-320.

- Land, M. F. (1998). The visual control of steering. In L. R. Harris & M. Jenkin (Eds.), *Vision and action*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Land, M. F., & Furneaux, S. (1997). The knowledge base of the oculomotor system. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 352, 1231-1239.
- Land, M. F., & Horwood, J. (1995). Which parts of the road guide steering? *Nature*, 377, 339-340.
- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369, 742-744.
- Lappe, M., Bremmer, F., & van den Berg, A. V. (1999a). Going against the flow: Reply to Harris and Rogers. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(12), 450.
- Lappe, M., Bremmer, F., & van den Berg, A. V. (1999b). Perception of self-motion from visual flow. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(9), 329-336.
- Lappe, M., & Rauschecker, J. P. (1995). An illusory transformation in a model of optic flow processing. *Vision Research*, 35(11), 1619-1631.
- Larish, J. F., & Flach, J. M. (1990). Sources or optical transformation useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 295-302.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437-459.
- Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception & Psychophysics*, 15(3), 529-532.
- Lee, D. N., & Lishman, R. (1977). Visual control of locomotion. *Scand. J Psychol.*, 18, 224-230.
- Lee, D. N., & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: A paradigm of ecological optics. *Nature*, 293, 293-294.
- Lewald, J., & Ehrenstein, W. H. (2000). Visual and proprioceptive shifts in perceived egocentric direction induced by eye-position. *Vision Research*, 40, 539-547.
- Liu, A. (1998). What the driver's eye tells the car's brain. In G. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception* (pp. 431-452). Amsterdam: Elsevier.
- Llewellyn, K. R. (1971). Visual guidance of locomotion. *Journal of Experimental Psychology*, 91(2), 245-261.
- Longuet-Higgins, H. C., & Prazdny, K. (1980). The interpretation of a moving retinal image. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 208, 385-397.
- McKee, S. P., & Nakayama, K. (1984). The detection of motion in the peripheral visual field. *Vision Research*, 24(1), 25-32.
- McKee, S. P., Silverman, G. H., & Nakayama, K. (1986). Precise velocity discrimination despite random variations in temporal frequency and contrast. *Vision Research*, 26(4), 609-619.

- McKee, S. P., & Welch, L. (1989). Is there a constancy for velocity? *Vision Research*, 29, 553-561.
- Meese, T., Smith, V., & Harris, M. G. (1995). Induced motion may account for the illusory transformation of optic flow fields found by Duffy and Wurtz. *Vision Research*, 35(7), 981-984.
- Melcher, G. A., & Henn, V. (1981). The latency of circular vection during different acceleration of the optokinetic stimulus. *Perception & Psychophysics*, 30(6), 552-556.
- Mestre, D. R., & Masson, G. S. (1997). Ocular responses to motion parallax stimuli: The role of perceptual and attentional factors. *Vision Research*, 37, 1627-1641.
- Michaels, R. M., & Cozan, L. W. (1962). Perceptual and field factors causing lateral displacement. *Highway Research Record*, 32, 1-13.
- Monen, J., & Brenner, E. (1994). Detecting changes in one's own velocity from optic flow. *Perception*, 23, 681-690.
- Morgan, C. L. (1978). Constancy of egocentric visual direction. *Perception & Psychophysics*, 23(1), 61-68.
- Motorcycle Safety Foundation. (1992). *Evaluating, coaching, and range management instructor's guide*. Irvine, CA: Author.
- Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors*, 14(4), 325-335.
- Murray, D. W., & Buxton, B. F. (1990). *Experiments in the machine interpretation of visual motion*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Nakayama, K. (1985). Biological image motion processing: A review. *Vision Research*, 25(5), 625-660.
- Nakayama, K. (1994). James J. Gibson - an appreciation. *Psychological Review*, 101(2), 329-335.
- Nakayama, K., & Loomis, J. M. (1974). Optical velocity patterns, velocity-sensitive neurons, and space perception: A hypothesis. *Perception*, 3, 63-80.
- Neumann, T. R. (2002). Modeling insect compound eyes: Space-variant spherical vision. In H. H. Bülhoff, S.-W. Lee, T. Poggio, & C. Wallraven (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Workshop on Biologically Motivated Computer Vision BMCV 2002* (pp. 360-367). Berlin: Springer-Verlag.
- Niemann, T., Lappe, M., Büscher, A., & Hoffmann, K.-P. (1999). Ocular responses to radial optic flow and single accelerated targets. *Vision Research*, 39, 1359-1371.
- Orban, G. A., Van Calenbergh, F., De Bruyn, B., & Maes, H. (1985). Velocity discrimination in central and peripheral visual field. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 1836-1847.

- Pack, C., & Mingolla, E. (1998). Global induced motion and visual stability in an optic flow illusion. *Vision Research*, 38, 3083-3093.
- Palmisano, S., & Gillam, B. (1998). Stimulus eccentricity and spatial frequency interact to determine circular vection. *Perception*, 27, 1067-1077.
- Pauls, T. P. (1925). Transverse distribution of motor vehicle traffic on paved highways. *Public Roads*, 6, 243-257.
- Pelz, J., Hayhoe, M., & Loeber, R. (2001). The coordination of eye, head, and hand movements in a natural task. *Experimental Brain Research*, 139, 266-277.
- Perrone, J. A., & Thiele, A. (2001). Speed skills: Measuring the visual speed analysis properties of primate MT neurons. *Nature Neuroscience*, 4(5), 526-532.
- Post, R. B., & Chaderjian, M. (1988). The sum of induced and real motion is not a straight path. *Perception & Psychophysics*, 43, 121-124.
- Post, R. B., & Heckmann, T. (1986). Induced motion and apparent straight ahead during prolonged stimulation. *Perception & Psychophysics*, 40(4), 263-270.
- Post, R. B., & Leibowitz, H. W. (1985). A revised analysis of the role of efference in motion perception. *Perception*, 14, 631-643.
- Previc, F. H., & Mullen, T. J. (1990). A comparison of the latencies of visually induced postural change and self-motion perception. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, 1(3), 317-323.
- Prokop, T., Schubert, M., & Berger, W. (1997). Visual influence on human locomotion: Modulation to changes in optic flow. *Exp. Brain Res.*, 114, 63-70.
- Ramachandran, V. S., & Cavanagh, P. (1987). Motion capture anisotropy. *Vision Research*, 27, 97-106.
- Reader, W. O., Chatziastros, A., Cunningham, D. W., Bühlhoff, H. H., & Cutting, J. E. (2002). Gaze-eccentricity effects on road position and steering. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8(4), 247-258.
- Reader, W. O., Chatziastros, A., Cunningham, D. W., Cutting, J. E., & Bühlhoff, H. H. (in Druck). Drivers steer in their direction of gaze. In A. C. Gale & M. H. Freeman (Eds.), *Vision in Vehicles IX*. Amsterdam: Elsevier.
- Redlick, F. P., Jenkin, M., & Harris, L. R. (2001). Human can use optic flow to estimate distance of travel. *Vision Research*, 41, 213-219.
- Reichardt, W. (1961). Autocorrelation, a principle for the evaluation of sensory information by the central nervous system. In W. Rosenblith (Ed.), *Sensory Communication*. New York: Wiley.
- Reid, L. D., Solowka, E. N., & Billing, A. M. (1981). A systematic study of driver steering behaviour. *Ergonomics*, 24(6), 447-462.

- Reinhardt-Rutland, A. H. (1988). Induced movement in the visual modality: An overview. *Psychological Bulletin*, 103(1), 57-71.
- Reisbeck, T. E., & Gegenfurtner, K. R. (1999). Velocity tuned mechanisms in human motion processing. *Vision Research*, 39, 3267-3285.
- Rieger, J. H., & Lawton, D. T. (1985). Processing differential image motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2(2), 354-360.
- Riemersma, J. B. J. (1981). Visual control during straight road driving. *Acta Psychologica*, 48, 215-225.
- Royden, C. S., Banks, M. S., & Crowell, J. A. (1992). The perception of heading during eye movements. *Nature*, 360, 583-585.
- Royden, C. S., Crowell, J. A., & Banks, M. S. (1994). Estimating heading during eye movements. *Vision Research*, 34(23), 3197-3214.
- Royden, C. S., & Hildreth, E. C. (1996). Human heading judgements in the presence of moving objects. *Perception & Psychophysics*, 58(6), 836-856.
- Rushton, S. K., Harris, J. M., Lloyd, M. R., & Wann, J. P. (1998). Guidance of locomotion on foot uses perceived target location rather than optic flow. *Current Biology*, 8, 1191-1194.
- Rushton, S. K., & Salvucci, D. D. (2001). An egocentric account of the visual guidance of locomotion. *Trends in Cognitive Science*, 5(1), 6-7.
- Schulman, P. H. (1979). Eye-movements do not cause induced motion. *Perception & Psychophysics*, 25, 381-383.
- Shenoy, K. V., Bradley, D. C., & Andersen, R. A. (1999). Influences of gaze rotation on the visual response of primate MSTd neurons. *Journal of Neurophysiology*, 81(6), 2764-2786.
- Shinar, D., McDowell, E. D., & Rockwell, T. H. (1977). Eye movements in curve negotiation. *Human Factors*, 19(1), 63-71.
- Smeets, J. B. J., & Brenner, E. (1995). Perception and action are based on the same visual information: Distinction between position and velocity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 19-31.
- Smith, A. T. (1987). Velocity perception and discrimination: Relation to temporal mechanisms. *Vision Research*, 27(9), 1491-1500.
- Smith, A. T., & Edgar, G. K. (1990). The influence of spatial frequency on perceived temporal frequency and perceived speed. *Vision Research*, 30(10), 1467-1474.
- Smith, A. T., & Edgar, G. K. (1991). The separability of temporal frequency and velocity. *Vision Research*, 31(2), 321-326.
- Snowden, R. J., Stimpson, N., & Ruddle, R. A. (1998). Speed perception fogs up as visibility drops. *Nature*, 392, 450-450.

- Srinivasan, M. V., Lehrer, M., Kirchner, W., & Zhang, S. W. (1991). Range perception through apparent image speed in freely-flying honeybees. *Visual Neuroscience*, 6, 519-535.
- Srinivasan, M. V., Zhang, S., Altwein, M., & Tautz, J. (2000). Honeybee navigation: Nature and calibration of the "odometer". *Science*, 287, 851-853.
- Srinivasan, M. V., & Zhang, S. W. (1993). Evidence for two distinct movement-detecting mechanisms in insect vision. *Naturwissenschaften*, 80, 38-41.
- Srinivasan, M. V., & Zhang, S. W. (1997). Visual control of honeybee flight. *EXS*, 84, 95-113.
- Srinivasan, M. V., & Zhang, S. W. (2000). Visual navigation in flying insects. In M. Lappe (Ed.), *Neuronal processing of optic flow* (pp. 67-92). London: Academic Press.
- Stone, L. S., & Perrone, J. A. (1997). Human heading estimation during visually simulated curvilinear motion. *Vision Research*, 37(5), 573-590.
- Stone, L. S., & Thompson, P. (1992). Human speed perception is contrast dependent. *Vision Research*, 32, 1535-1549.
- Summala, H., Leino, M., & Vierimaa, J. (1981). Drivers' steering behavior when meeting another car: The case of perceptual tropism revisited. *Human Factors*, 23(2), 185-189.
- Tanaka, K. (1998). Representation of visual motion in the extrastriate visual cortex. In T. Watanabe (Ed.), *High-level motion processing* (pp. 295-313). London: MIT Press.
- Taragin, A. (1955). Driver behavior as affected by objects on highway shoulders. *Highway Research Board Proceedings*, 34, 453-472.
- te Pas, S. F., Kappers, A. M. L., & Koenderink, J. J. (1998). Locating the singular point in first-order optical flow fields. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(5), 1415-1430.
- Tayama, T. (2000). The minimum temporal thresholds for motion detection of grating patterns. *Perception*, 29, 761-769.
- Telford, L., Spratley, J., & Frost, B. J. (1992). Linearvection in the central visual field facilitated by kinetic depth cues. *Perception*, 21(3), 337-49.
- Thomson, J. A. (1983). Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion? *Journal of Experimental Psychology*, 9(3), 427-443.
- TRAINER. *Scenarios feedback form*. Generaldirektion Energie und Verkehr (DG TREN) der Europäische Kommission. Internet: http://www.trainer.iao.fhg.de/Scenarios_feedback_form.doc
Abgerufen am 11.09.02.
- Triggs, T. (1980). The influence of oncoming vehicles on automobile lateral position. *Human Factors*, 22(4), 427-433.

- Triggs, T. (1997). The effect of approaching vehicles on the lateral position of cars travelling on a two-lane rural road. *Australian Psychologist*, 32(3), 159-163.
- Turano, K., & Pantle, A. (1989). On the mechanisms that encodes the movement of contrast variations: Velocity discrimination. *Vision Research*, 29, 207-221.
- Vaina, L. M., & Rushton, S. K. (2000). What neurological patients tell us about the use of optic flow. In M. Lappe (Ed.), *Neuronal processing of optic flow* (pp. 293-313). London: Academic Press.
- van Winsum, W. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human Factors*, 38(4), 434-441.
- Waespe, W., & Henn, V. (1977). Vestibular nuclei activity during optokinetic after-nystagmus (OKAN) in the alert monkey. *Experimental Brain Research*, 30, 323-330.
- Wann, J., & Land, M. (2000). Steering with or without the flow: Is the retrieval of heading necessary? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(8), 319-324.
- Wann, J., & Land, M. (2001). Heading in the wrong direction. *Trends in Cognitive Science*, 5(1), 8-9.
- Wann, J. P., & Swapp, D. K. (2000). Why you should look where you are going. *Nature Neuroscience*, 3(7), 647-648.
- Warren, R. (1982). *Optical transformations during movement: Review of the optical concomitants of egospeed*. Columbus: Ohio State University, Department of Psychology, Aviation Psychology Laboratory.
- Warren, W. H. (1998a). The state of flow. In T. Watanabe (Ed.), *High-level motion processing* (pp. 315-358). London: MIT Press.
- Warren, W. H. (1998b). Visually controlled locomotion: 40 years later. *Ecological Psychology*, 10(3-4), 177-250.
- Warren, W. H., Blackwell, A. W., Kurtz, K. J., Hatsopoulos, N. G., & Kalish, M. L. (1991a). On the sufficiency of the velocity field for perception of heading. *Biological Cybernetics*, 65, 311-320.
- Warren, W. H., & Hannon, D. J. (1990). Eye movements and optic flow. *J. Opt. Soc. Am. A*, 7(1), 160-169.
- Warren, W. H., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P., & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience*, 4(2), 213-216.
- Warren, W. H., & Kurtz, K. J. (1992). The role of central and peripheral vision in perceiving the direction of self-motion. *Perception & Psychophysics*, 51(5), 443-454.
- Warren, W. H., Mestre, D. R., Blackwell, A. W., & Morris, W. (1991b). Perception of circular heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(1), 28-43.

- Warren, W. H., Morris, M. W., & Kalish, M. (1988). Perception of translational heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(4), 646-660.
- Warren, W. H., & Saunders, J. A. (1995). Perceiving heading in the presence of moving objects. *Perception*, 24(3), 315-331.
- Warzecha, A. K., & Egelhaaf, M. (1996). Intrinsic properties of biological motion detectors prevent the optomotor control system from getting unstable. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London - Series B: Biological Sciences*, 351, 1579-1591.
- Welch, R. B. (1978). *Perceptual modification: Adapting to altered sensory environments*. New York: Academic Press.
- Westwood, D. A., Chapan, C. D., & Roy, E. A. (2000). Pantomimed actions may be controlled by the ventral visual stream. *Experimental Brain Research*, 130, 545-548.
- Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2002). Driving as night falls: The contribution of retinal flow and visual direction to the control of steering. *Current Biology*, 12, 2014-2017.
- Wilson, H. R., McFarlane, D. K., & Phillips, G. C. (1983). Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking. *Vision Research*, 23, 873-882.
- Wolpert, L. (1988). *The active control of altitude over differing textures*. Paper presented at the Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Human Factors Society, Santa Monica, CA.
- Wood, R. M., Harvey, M. A., Young, C. E., Beedie, A., & Wilson, T. (2000). Weighting to go with the flow? *Current Biology*, 10(15), R545-R546.
- Zangemeister, W. H., Jones, A., & Stark, L. (1981). Dynamics of head movement trajectories: Main sequence relationship. *Experimental Neurology*, 71(1), 76-91.
- Zivotofsky, A. Z., Averbuch-Heller, L., Thomas, C. W., Das, V. E., Discenna, A. O., & Leigh, R. J. (1995). Tracking of illusory target motion: Differences between gaze and head responses. *Vision Research*, 35(21), 3029-3035.

DANKSAGUNG

Diese Arbeiten wären ohne eine ganze Reihe von Leuten nicht entstanden. Sie alle, genannt oder ungenannt, haben auf die eine oder andere Weise zur Entstehung der Arbeit beigetragen. Ihnen Allen gilt an dieser Stelle mein größter Dank.

Herrn Prof. Heinrich Bühlhoff möchte ich für die Möglichkeit danken, die Arbeit in seiner einmaligen Arbeitsgruppe angefertigt haben zu dürfen. Auch danke ich ihm für sein Vertrauen, welches er mir bei dieser Forschungsarbeit und auch in anderen Projekten entgegengebracht hat. Herrn Prof. Karl Gegenfurtner möchte ich danken, dass ich vor langer Zeit im Rahmen eines Forschungspraktikums unter seiner Leitung die Arbeitsgruppe in Tübingen kennenlernen konnte und er sich auch bereit erklärt hat die Betreuung der Dissertation zu übernehmen.

Allen Kollegen am Institut, die durch Anregungen und Kritik an der Arbeit zum Gelingen beigetragen haben, möchte ich meinen Dank aussprechen. An dieser Stelle möchte ich Simon Rushton, Marty Banks, Amos Cohen und Claes von Hofsten für ihre Zeit zu Diskussionen danken, die sie mir während der gelegentlichen Treffen schenkten.

Guy Wallis verdanke ich meinen Start in die Forschungs- und Programmierwelt. Sein so häufig eingesetztes Performer-Urprogramm, das sich im Wesentlichen seitdem nicht verändert hat, durchzieht im Hintergrund fast alle hier dargestellten Arbeiten. Susanne Huber und Jan Restat danke ich für die Korrekturen des Manuskripts.

Dagmar Maier, Walter Heinz, Phillip Georg, Stephan Braun, Michael Renner, Hans-Günter Nusseck und den technischen Assistenten danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei allen organisatorischen sowie technischen Problemen und Anliegen. Chris Christou, Fiona Newell, Marc Ernst, Rainer Rothkegel, Rainer Rosenzweig, Jan Wiener, Melanie Wengert, Mario Kleiner, Wil Readinger, Alexa Ruppertsberg für Anregung und Kritik auch in weniger institutsnahen Umgebungen.

Nicht zuletzt möchte ich den hundertundeins Versuchspersonen danken, die ihr ganz persönliches Datum bei mir ließen.

Meinen Familien Huber und Chatziastros danke ich für die viele kleinen und großen Hilfen. Ich hoffe, ich habe meinen Eltern keine allzu große Schande bereitet, dass ich nach so vielen Jahren immer noch, wie sie sagen, Student bin. Bei Susanne Huber bedanke ich mich nach letzter Zählung für eigentlich alles.

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Name: Astros Chatziastros
Geburtsdatum: 05.02.1969
Geburtsort: Reutlingen

Schul Ausbildung

1975 - 1979 Jos-Weiss-Grundschule, Reutlingen
1979 - 1981 Eichendorff-Realschule, Reutlingen
1981 - 1989 Johannes-Kepler-Gymnasium, Reutlingen
1974 - 1983 Griechische Grundschule und Gymnasium, Reutlingen
06.1989 Abitur

Wehrdienst

11.1989 - 05.1990 Militärdienst in Griechenland

Studium

10.1990 - 07.1997 Psychologiestudium, Universität Tübingen
03.1995 - 05.1995 Klinisch-psychologisches Praktikum, Universität Gießen, PD Dr. Alfons Hamm
06.1995 - 08.1995 Forschungspraktikum, Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen, Dr. Karl Gegenfurtner
07.1997 Diplom in Psychologie
Diplomarbeit: „Über die Bedeutung visueller Reize bei der Positionskontrolle eines Fahrzeugs in einer simulierten Umwelt“, Prof. Dr. Friedrich Wilkening

Wissenschaftliche Tätigkeit

08.1997 - Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, Tübingen, Prof. Dr. Heinrich Bülthoff

Hiermit versichere (gestehe, schwöre, wette) ich (wem auch immer), dass

- ⊗ ich diese Arbeit selbstständig angefertigt habe
- ⊗ keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe

Tübingen, 24.12.02

Astros Chatziastros