

Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung



Inauguraldissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades
der Humanwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Köln
vorgelegt von

Matus Simkovic

aus Bratislava, Slowakei

Köln 2015

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Birgit Träuble (Köln)
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Christoph Stahl (Köln)

Tag der mündlichen Prüfung: 18.11.2015

Diese Dissertation wurde von der Humanwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln im November 2015 angenommen.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Studien zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung vorgestellt. Dabei steht die Frage im Mittelpunkt, welche Bewegungsmerkmale die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung vermitteln und welche kognitiven Mechanismen diese Wahrnehmung unterstützen.

In der ersten Studie wurde untersucht, wie Erwachsene die Verfolgungsbewegung zweier filmisch dargebotener geometrischer Figuren entdecken. Die Verfolgung zweier Akteure (Beute und Jäger) wurde zeitgleich mit einer zufälligen Bewegung von zwölf Distraktoren auf einem Bildschirm präsentiert. Mittels Eyetracking wurden die Augenbewegungen der Versuchspersonen erfasst. Das Blickverhalten wurde in Sakkaden, Fixationen, glatte Augenbewegungen sowie in Phasen der Blickverfolgung und der Exploration unterteilt. Es wurde analysiert, welche Stimulusmerkmale diese Ereignisse begleiten. Insbesondere wurde darauf geachtet, welche Bewegungsmerkmale für die Entdeckung der Verfolgung wichtig waren. Es konnte gezeigt werden, dass die Beute und der Jäger entweder getrennt oder als Gruppe verfolgt wurden. Die Versuchspersonen wechselten zwischen diesen beiden Verfolgungsstrategien. Wenn die beiden Stimuli als Gruppe verfolgt wurden, fing der Blick bei der Beute an und wechselte dann allmählich zum Jäger über. Dieser Wechsel wurde durch eine Verlangsamung der Blickverfolgung erreicht. Die Sakkaden fokussierten saliente Gebiete mit hoher Dichte der Akteure. Die Versuchspersonen stuften die Bewegung zweier Stimuli, die sich hintereinander im Abstand von 3,5 bis 3,8 Grad des Gesichtswinkels in die gleiche Richtung bewegten, als Verfolgung ein. Die Merkmale der Bewegung, die als Verfolgung eingestuft wurde, entsprachen den Merkmalen der vom Versuchsleiter gewählten Stimuli. Die Versuchspersonen lernten die Stimulusmerkmale während der ersten Trials anhand einer Rückmeldung über ihre Erfolgsrate kennen. Die Befunde werden im Zusammenhang mit den Annahmen früherer Forschung zur Domänenspezifität der Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung diskutiert.

Im Zentrum der zweiten Studie stand die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei

Säuglingen. Um Säuglinge zu motivieren nach einer Verfolgung zu suchen, wurde das Verfolgungsereignis zeitgleich mit einer Belohnung präsentiert. Wenn die Säuglinge für kurze Zeit die Verfolgung fokussierten begannen die Beute und der Jäger violett zu flimmern. Das Flimmern sollte die Säuglinge motivieren, die Verfolgung zu suchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Säuglinge, nachdem die Verfolgung zeitgleich mit dem Flimmern gezeigt wurde, nicht länger auf eine nicht-flimmernde Verfolgung schauten als eine Vergleichsgruppe von Säuglingen, die vor der nicht-flimmernden Verfolgung keine flimmernde Verfolgung sahen. Bei einem Vergleich des Blickverhaltens der Säuglinge mit einer parallel untersuchten Erwachsenenstichprobe sowie mit einer Kontrollberechnung, in welcher zufälliges Blickverhalten simuliert wurde zeigte sich, dass die Säuglinge ihren Blick auf Gebiete mit hoher visueller Salienz richteten. Auch diese Befunde werden in Hinsicht auf die Domänenspezifität der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Was ist eine Domäne und welche Mechanismen sind domänenspezifisch?	3
1.2	Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung	4
1.3	Drei Forschungsgenerationen	8
1.4	Was sind die kognitiven Bausteine der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung?	10
1.5	Überlegungen zur Stimulus- und Aufgabengestaltung	12
1.6	Entwicklung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung	15
1.7	Analyse von Muster- und Klassifizierungsbildern.	19
1.8	Blickbewegungen und Eyetracking	22
1.9	Zwei empirische Studien	23
2	Musteranalysen der Verfolgungsentdeckung mit Eyetracking	25
2.1	Einleitung	25
2.2	Methoden	26
2.2.1	Stichprobe	26
2.2.2	Stimuli	26
2.2.3	Durchführung	27
2.2.4	Verarbeitung der Blickdaten	28
2.3	Ergebnisse	32
2.3.1	Entscheidungszeitpunkt	32
2.3.2	Musteranalysen der Sakkadenziele	35
2.3.3	Welche Bewegungsmuster lösen Blickverfolgung aus?	37
2.3.4	Visuelle Salienz der Sakkadenziele	40
2.3.5	Musteranalysen der glatten Augenbewegungen	44
2.3.6	Reaktionszeiten und Genauigkeit	48
2.3.7	Musteranalysen der Stimuli	51

2.4	Diskussion	53
2.4.1	Bewertung der Musteranalysen	54
3	Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei Säuglingen	56
3.1	Einleitung	56
3.2	Methoden	58
3.2.1	Stichprobe	58
3.2.2	Stimulus	58
3.2.3	Versuchsdesign	58
3.2.4	Echtzeitberechnung der Fixationen	59
3.2.5	Ablauf	60
3.3	Ergebnisse	60
3.3.1	Definition der Zustände	60
3.3.2	Gesamtdauer der Zustände	61
3.3.3	Mediandauer der Zustände	63
3.3.4	Übergänge zwischen den Zuständen	65
3.4	Diskussion	68
3.4.1	Verfolgung mit und ohne Flimmern	68
3.4.2	Einfluss der Bewegungsmerkmale	70
3.4.3	Vergleich zum zufälligen Blickverhalten	71
4	Allgemeine Diskussion	72
4.1	Blickverfolgung und Aufmerksamkeit	72
4.2	Bayesianische Statistik	75
4.3	Automatisierte Kameraüberwachung als Anwendungsgebiet	77
4.4	Domänenspezifisch oder domänenallgemein?	79

Abbildungsverzeichnis

2.1	Veranschaulichung der Grundzustände	31
2.2	Schienendiagramme der Durchschnittsmuster zum Entscheidungszeitpunkt	35
2.3	Visuelle Salienz der explorativen Sakkaden	42
2.4	Visuelle Salienz der ersten Aufholsakkade	44
2.5	Schienendiagramme der Durchschnittsmuster bei glatter Augenbewegung	47
2.6	Blickgeschwindigkeit während der glatten Augenbewegung	48
2.7	Reaktionszeiten und Genauigkeit	49
2.8	Anteil der Sakkaden, die von einem Tastendruck oder von einer weiteren Sakkade gefolgt werden	50
2.9	Genauigkeit in den ersten 240 Trials	51
3.1	Gesamtdauer der Zustände	61
3.2	Mediandauer der Zustände	63
3.3	Mediandauer der Trainingstrials, der Testrials und der Kontrollrials .	64
3.4	Zustandsübergangsdiagramm	66
3.5	Übergangswahrscheinlichkeit	67

Tabellenverzeichnis

2.1	Schwellenwerte zur Bestimmung der Grundzustände	28
2.2	Anteil der Varianz, der durch die Hauptkomponenten erklärt wird . .	33
2.3	Geschwindigkeit, Absetzung und Abstand der Akteure	34
2.4	Anzahl der Sakkaden	36
2.5	Ergebnisse der SVM Klassifizierung	38
3.1	Anteile der Zustände	62
3.2	Korrelation zwischen den Übergangswahrscheinlichkeiten	67

Verzeichnis der Filmabschnitte

In den hier dargestellten Studien wurden dynamische Stimuli eingesetzt. Die Stimuli, sowie die Ergebnisse der Studien werden daher oft als Filmabschnitte dargestellt. Die Filmabschnitte sind auf einer CD zusammen mit einer digitalen Version des Textes dieser Arbeit beigefügt. Die Filmabschnitte können auch von der Autorenwebsite heruntergeladen werden:

<http://github.com/simkovic/dissertation/archive/master.zip>

An dieser Stelle folgt eine kurze Beschreibung der Filmabschnitte.

Film 1 Der Film veranschaulicht eine Blickverfolgung während der die verfolgten Akteure einen Abstand von mehr als 4 Grad erreichen. Die Darstellung wird im Absatz 2.2.4 erklärt.

Film 2 Der Film zeigt ein typisches Beispiel für die Blickbewegungen während der Entdeckungsaufgabe. Für weitere Details zur Darstellung siehe Absatz 2.2.4.

Film 3 Der Film zeigt die Durchschnittsmuster zum Zeitpunkt der Entscheidung. Jede Zeile zeigt die Muster für jeweils eine Versuchsperson. Die Spalten zeigen unterschiedliche Entscheidungszeitpunkte. Die Zeitachse erstreckt sich von 800 Ms vor dem Entscheidungszeitpunkt bis zum Entscheidungszeitpunkt. Der Entscheidungszeitpunkt wird 500, 400, 300, 200, 100 und 50 Ms vor dem Tastendruck gesetzt.

Film 4 Der Film zeigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Ausschnitte zum Zeitpunkt der Entscheidung. Die zehn Hauptkomponenten mit dem höchsten Varianzanteil werden in den Spalten gezeigt. Jede Zeile zeigt die Hauptkomponenten für jeweils eine Versuchsperson.

Film 5 Die dritte Zelle von links in jeder Reihe zeigt jeweils die Summe der ersten zwei Hauptkomponenten.

Film 6 Der Film zeigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Ausschnitte der Ziele der explorativen Sakkaden. Die zehn Hauptkomponenten mit dem höchsten Varianzanteil werden in den Spalten gezeigt. Jede Zeile zeigt die Hauptkomponenten für jeweils eine Versuchsperson.

Film 7 Der Film zeigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Ausschnitte der Ziele der Aufholsakkaden. Die zehn Hauptkomponenten mit dem höchsten Varianzanteil werden in den Spalten gezeigt. Jede Zeile zeigt die Hauptkomponenten für jeweils eine Versuchsperson.

Film 8 Die Zellen zeigen die Minima und Maxima der Entscheidungsfunktion der SVM. Jede Zeile zeigt die Ergebnisse für jeweils eine Versuchsperson. Die Spalten zeigen die Wiederholungen. Die Hintergrundfarbe der Maxima ist schwarz.

Film 9 Die Zellen zeigen die Durchschnittsmuster der glatten Augenbewegungen wenn die Ausschnitte bezüglich ihres Anfangs abgestimmt sind. Jede Zeile zeigt die Ergebnisse für jeweils eine Versuchsperson. Es wurden die Muster für Ausschnitte mit einem, zwei und mehr als zwei Akteuren getrennt berechnet. Diese werden in den Spalten gezeigt.

Film 10 Die Zellen zeigen die Durchschnittsmuster der glatten Augenbewegungen wenn zwei Akteure verfolgt wurden. Jede Zeile zeigt die Ergebnisse für jeweils eine Versuchsperson. Die Ausschnitte wurden jeweils am Anfang, in der Mitte und am Ende gekoppelt.

Film 11 Der Film zeigt einen Trial der Versuchsperson 1. Dieser Trial veranschaulicht deren Verfolgungsstrategie. Versuchsperson 1 verfolgt die einzelnen Akteure und wechselt zwischen diesen mit Hilfe von Aufholsakkaden. Für weitere Details zu der Darstellung siehe Absatz 2.2.4.

Film 12 Der Film zeigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Ausschnitte mit der Verfolgung in der Mitte. Die fünf Hauptkomponenten mit dem höchsten Varianzanteil werden in den Spalten gezeigt. Jede Zeile zeigt die Hauptkomponenten für jeweils eine Versuchsperson.

Film 13 Der Film zeigt einen Trial der Versuchsperson 3 in dem diese eine Annäherung als Verfolgung eingestuft hat. Für weitere Details zu der Darstellung siehe Absatz 2.2.4.

Film 14 Der Film zeigt einen Trial der Versuchsperson 3 in dem sie zwei Akteure, die sich fast parallel bewegen, als Verfolgung eingestuft hat. Für weitere Details zu der Darstellung siehe Absatz 2.2.4.

Kapitel 1

Einleitung

Heider und Simmel (1944) haben gezeigt, dass eine Bewegung einfacher geometrischer Figuren wie Dreiecke und Kreise bei Beobachtern den starken Eindruck einer sozialen Interaktion hervor rufen kann. Heider und Simmel (1944) zeigten kurze Zeichentrickfilme, in denen ein kleines Dreieck und ein Kreis vor einem großen Dreieck flohen. Sie präsentierten diese Filmabschnitte menschlichen Beobachtern und ließen sie das Geschehen anschließend beschreiben. In ihren Beschreibungen, wiesen die Beobachter den geometrischen Figuren Ziele, Absichten und Motivationen zu - als ob es sich um menschliche Akteure handeln würde. Michotte (1963) belegte, dass sich mit einfachen geometrischen Figuren der Eindruck einer kausalen Bewegung erzeugen läßt. In Michottes Filmabschnitten stieß ein Kreis gegen einen ruhenden Kreis. Nach dem Zusammenstoß blieb der erste Kreis stehen und der zweite Kreis bewegte sich in Richtung der Bewegung des ersten Kreises weiter.

Es überrascht kaum, dass Menschen kausale oder soziale Interaktionen erkennen können. Anders als im Alltagsleben, wurde in den Studien von Heider und Simmel (1944) und Michotte (1963) die Bewegung jedoch durch zweidimensionale geometrische Figuren dargestellt die normalerweise nicht physiologischen Gesetzen oder Regeln der sozialen Interaktion folgen. In den genannten Studien wurde weiterhin gezeigt, dass es Beobachtern schwer fällt, solche kausalen oder sozialen Interpretationen zu vermeiden. In dieser Hinsicht ähneln die Demonstrationen von Heider und Simmel (1944) und Michotte (1963) optischen Täuschungen, die sich ebenfalls nicht willkürlich unterbinden lassen. Bereits Michotte (1963) bemerkte diese Ähnlichkeit. Er diskutierte die Unterscheidung zwischen perzeptuellen und kognitiven Aspekten der Kausalität und hob den Beitrag der ersteren vor: seine Monographie trägt den Titel „Wahrnehmung der Kausalität“.

In der Folge belegten weitere Studien solche Phänomene im Bereich der Sprache. Diese Belege bewegten schließlich den Philosophen Jerry Fodor dazu, sich systematisch mit dieser Art von Phänomenen auseinander zu setzen Fodor (1983). Fodor postulierte eine zweiklassen Unterscheidung psychologischer Prozesse in modulare und nichtmodulare Prozesse. Bei den modularen Prozessen handelt es sich laut Fodor (unter anderem) um domänenspezifische perzeptuelle Eingabesysteme, die automatisiert ablaufen. Die nichtmodularen Prozesse sind domänenallgemeine konzeptuelle zentrale Systeme die willentlich gesteuert werden. So wird beispielsweise die Wahrnehmung als modular, Denken oder Problemlösen dagegen als nicht modulare Prozesse angenommen. Zentrale Systeme benötigen laut Fodor als Eingabe die Ergebnisse der Eingabesysteme. Beim Problemlösen beispielsweise erhält der Mensch durch die Wahrnehmung Auskunft über die Aufgabe. Die Eingabesysteme verwenden nur domänen-spezifische Information. So verarbeiten Mechanismen der Tiefenwahrnehmung z.B. keine haptische Information. Beim Problemlösen wird dagegen Information aus allen Domänen genutzt. Mit der Automatismus-Eigenschaft ist gemeint, dass die Funktionsweise des Systems nicht bewusst gesteuert werden kann und auch nicht von dem Beobachter introspektiert werden kann. Ein Beispiel hierfür wären optische Täuschungen. Die Perzept-Konzept Unterscheidung schließlich besagt wie inhaltsreich die Ergebnisse resp. die Produkte der Verarbeitung der Systeme sind. Ergebnisse der zentralen Systeme sind inhaltsreich und bieten viel Information für eine weitere Inferenz. Den Begriff modular selbst hat Fodor aus der Informatik übernommen. In der Informatik wird ein System in Module mit klar definierten Schnittstellen unterteilt. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass Programmierer unabhängig voneinander und gleichzeitig an unterschiedlichen Modulen arbeiten können. Damit ist die Arbeit besser verteilt und es vereinfacht die Fehlersuche.

Fodors Idee wurde von der evolutionären Psychologie aufgenommen (Barkow, Cosmides & Tooby, 1995; Pinker, 1999). Allerdings wird in diesem Feld postuliert, dass auch die zentralen Systeme modular und damit domänenspezifisch seien. Diese Auffassung wurde von anderen Autoren (Buller, 2005; Richardson, 2007) und auch von Fodor (2001) aus konzeptuellen Gründen, sowie wegen mangelnder empirischer Unterstützung kritisiert. Milner und Goodale (1995) stellten Fodors Aufteilung in zentrale und Eingabesysteme infrage. Ebenfalls erfolgreich wurde Fodors Modularitätsidee in der Entwicklungspsychologie. Carey und Spelke (1994); Leslie (1994) und Carey (2009) nahmen Fodors Trennung auf, postulierten allerdings zusätzlich zu den beiden Mechanismus-Arten Fodors noch sogenannte Kernprozesse. Diese sind modu-

lar *und* konzeptuell und es wird daher oft auch von Kernwissen statt von Kernprozessen gesprochen. Die Einführung des Kernwissens führte zu einer stark nativistischen These, dass das konzeptuelle Wissen angeboren sei. Diese Auffassung wurde von Elman (1998) und Thelen und Smith (1996) infrage gestellt. Karmiloff-Smith (1995) und Thelen und Smith (1996) haben weiterhin davor gewarnt, dass Fodors Aufteilung die Theoriebildung in der Entwicklungspsychologie unnötig einschränke. Fodor hat für die Begriffe die er diskutierte, keine trennscharfen Definitionen angeboten. Seine zweiklassen Unterscheidung in Module und zentrale Prozesse hat er mit Beispielen illustriert. Das machte Fodors Idee populär. Bei fehlender Definitionsschärfe steht es weitgehend offen, Fodors Unterscheidung für eigene theoretische Zwecke zu adaptieren und anzupassen. Andererseits und wie bereits erwähnt, wird Fodors Unterscheidung sowie die Adaptionen seiner Nachfolger von vielen Autoren kritisch betrachtet. Fodors Verdienst ist darin zu sehen, dass er bestimmte Phänomene, insbesondere die domänenspezifische Prozesse, aufzeigte und diese gegenseitig in Zusammenhang brachte. Fodors theoretische Vorgänger, behavioristische Theorien sowie Piagets Theorie der Entwicklung, sahen keinen Raum für domänenspezifische Prozesse. Weiterhin stellte Fodor die Konzepte sowie das Vokabular bereit, mit deren Hilfe die spezifischen Eigenschaften dieser Prozesse diskutiert werden können. Die vorliegende Arbeit widmet sich mit einem Themenfeld, in welchem dieses Vokabular oft Anwendung findet. Bevor das Thema ausführlicher vorgestellt wird, ist es daher notwendig, Fodors Begriffe nochmals genauer zu betrachten. Von besonderem Interesse ist dabei die Frage, was als eine Domäne gezählt wird und wann man kognitive Prozesse als domänenspezifisch oder domänenallgemein einstufen soll.

1.1 Was ist eine Domäne und welche Mechanismen sind domänenspezifisch?

Fodors Definition erlaubt es, Domänen beliebig breit oder eng zu fassen. Bei den frühen Diskussionen um Fodors Modularitätsbegriff wurden Domänen oft als Sinnesdomänen verstanden (siehe die Diskussionsbeiträge zu Fodor, 1985). Das heißt, visuelle, auditive oder haptische Wahrnehmung stellen getrennte Domänen dar, die durch spezifische Module bedient werden. Die Domänenunterscheidung kann aber beliebig verfeinert werden und zum Beispiel können die (visuelle) Tiefenwahrnehmung,

die Größenwahrnehmung oder die Objektwahrnehmung als getrennte Domänen betrachtet werden. Die evolutionäre Psychologie hat weitere Domänen und zugehörige Module postuliert. Die Domänen sind dabei durch ihre evolutionäre Funktion definiert. Laut Auffassung der evolutionären Psychologie gibt es zum Beispiel ein Modul zur Partnerauswahl oder zur Erkennung von Betrügern. Kernwissen ist, wie Module, domänenspezifisch und lässt sich damit den Domänen zuordnen. Zum Beispiel listet Carey (2009) die Objekterkennung, Rechenfähigkeit oder die Erkennung von Belebtheit als Domänen des Kernwissens. Allerdings wird eine ähnliche Domänenaufteilung auch von Entwicklungspsychologen diskutiert, die keine Module und kein Kernwissen zur Erklärung des Verhaltens der Kinder heranziehen (zum Beispiel Gopnik, Meltzoff & Bryant, 1997; Karmiloff-Smith, 1995). Damit stellt sich der Verdacht, dass die Domänen einfach den (entwicklungs-) psychologischen Themengebieten statt einer Aufteilung der kognitiven Architektur entsprechen. Es gibt allerdings Fälle die eine solche Gleichstellung der Domänen und der Themengebiete nicht ermöglichen. Aufmerksamkeit oder Gedächtnis sind große Themengebiete, ihre Funktionsweise ist aber nicht auf bestimmte Inhalte eingeschränkt. Somit handelt es sich hierbei nicht um domänenspezifische Systeme¹.

Aus dieser Diskussion folgt, dass Domänen über domänenspezifische Prozesse definiert werden. Es genügt, einen domänenspezifischen Prozess für die jeweilige Domäne anzuführen, um dieses Themengebiet als eine Domäne zu qualifizieren. Ob man bestimmte Mechanismen und bestimmte Erklärungsansätze, die diese Mechanismen postulieren, als domänenspezifisch oder domänenallgemein betrachten soll, hängt dagegen davon ab, auf welches Themengebiet und auf welche Phänomene sich der Erklärungsansatz bezieht. So stellen beispielsweise die in Krekelberg (2008) beschriebenen Bewegungsdetektoren domänenspezifische Mechanismen für die Domäne der Bewegungswahrnehmung dar. Dieselben Detektoren gelten aber als domänenallgemein, wenn ein Bezug auf die Domäne der Wahrnehmung der Belebtheit oder auf die Domäne der Wahrnehmung der Kausalität hergestellt werden soll.

Nach der Definition des Domänenbegriffs soll im Folgenden das zentrale Thema der vorliegenden Arbeit in diesen Begriffsrahmen eingebunden werden.

¹Fodor versteht Aufmerksamkeit oder Gedächtnis als Ressourcen die von den zentralen Systemen an die Eingabesysteme verteilt werden.

1.2 Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung

Die Beiträge zur Modularitätsdiskussion lassen sich gut danach klassifizieren, wie viele domänenspezifische Mechanismen postuliert werden. Theoretiker der evolutionären Psychologie, gefolgt von Vertretern des Kernwissenssatzes postulieren eine Vielzahl domänenspezifischer Mechanismen. Auf der anderen Seite werden von Karmiloff-Smith (1995); Elman (1998) und Thelen und Smith (1996) die empirischen Befunde weitgehend durch die Interaktion domänenallgemeiner Prozesse wie Aufmerksamkeit, Motorik und Wahrnehmung erklärt. Bei Betrachtung dieser Debatten fällt auf, dass die Anhänger einer Domänen-Vielzahl Themengebiete wie Sprache, Kausalität oder Kategorisierung erforschen. Die Anhänger domänenallgemeiner Erklärungen beschäftigen sich dagegen vornehmlich mit der Wahrnehmung, dem Gedächtnis oder der Motorik. Um einen Eindruck zu bekommen sei einer Vergleich der Themenauswahl bei Carey (2009) mit der Themenauswahl bei Thelen und Smith (1996) empfohlen. Je nach dem, ob der Forschungsfokus eher auf der Wahrnehmung oder der Sprache liegt, tendiert der Forscher dazu, viele oder wenige domänenspezifische Mechanismen zu postulieren. Diejenigen kognitiven Leistungen die nicht eindeutig einem der Themengebiete dieser Forscher zuzuordnen sind, bieten interessante Forschungsfelder, bei denen sich beide unterschiedlichen Ansätze gut gegenüberstellen lassen. Die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung, das Thema der vorliegenden Arbeit, ist eben eine solche kognitive Leistung.

Die vermutlich einfachste Art zielgerichteter Bewegung ist Jagen: ein Akteur hat ein Objekt zum Ziel. In den meisten Studien zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung wird ein anderer Akteur als Ziel verwendet was zu einer Verfolgungsbewegung führt (Dittrich & Lea, 1994; Gao, McCarthy & Scholl, 2010; Gao, Newman & Scholl, 2009; Gao & Scholl, 2011; Meyerhoff, Schwan & Huff, 2014a, 2014b). Andere Interaktionen zweier Akteure, wie Kämpfen oder Umwerben sind jedoch möglich und wurden untersucht (Blythe, Todd & Miller, 1999). Dabei ist wichtig, dass wie bei Heider und Simmel (1944) die Bewegung nur anhand der Bewegungseigenschaften der Objekte als zielgerichtet erkannt werden und andere Merkmale, wie etwa das Aussehen der Akteure nicht zur Erkennung beitragen.

Die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung ist von Themengebieten wie der Bewegungswahrnehmung oder der Wahrnehmung biologischer Bewegung abzugrenzen. Bei diesen werden vorwiegend domänenallgemeine Erklärungen herangezogen. Bei der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung werden zwar auch allgemeine Bewegungswahrnehmungsmech-

anismen benötigt (Krekelberg, 2008), die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung ist jedoch spezifischer. Um die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung zu erklären, müssen entweder zusätzliche domänenspezifische Mechanismen postuliert werden oder es muss zumindest erklärt werden, wie die domänenallgemeinen Leistungen die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung ermöglichen. In Studien zur Wahrnehmung biologischer Bewegung (Troje, 2008) wird die Bewegung eines Lebewesens mittels Lichtpunkten dargestellt. Dem gegenüber ist es bei der Untersuchung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung nicht die Aufgabe, den Akteur zu erkennen (dieser ist meistens klar erkennbar). Stattdessen ist die Aufgabe des Beobachters, die Interaktion (z.B. die Verfolgung) zu erkennen.

Bei anderen angrenzenden Themengebieten wie der Wahrnehmung und Bewertung der Belebtheit (Tremoulet & Feldman, 2000) oder der Beurteilung der Motive, Ziele und Absichten der Akteure (Baker, Saxe & Tenenbaum, 2009) sind dagegen domänenspezifische Erklärungen verbreitet. Für solche Urteile können zusätzlich zur Bewegungstrajektorie weitere Informationsquellen wie etwa die Anatomie des Akteurs, seine Fähigkeit, sich selbst zu bewegen sowie der Gesichtsausdruck, die Gestik oder andere Kommunikation herangezogen werden. Die zielgerichtete Bewegung muss keine ausreichende Evidenz für die Belebtheit des Akteurs liefern.

Aus dieser Diskussion wird ersichtlich, dass es zwischen den Themen Überlappungen gibt. Die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung wird oft zusammen mit der Wahrnehmung von Belebtheit (Scholl & Gao, 2013) oder mit der Wahrnehmung von Kausalität diskutiert (Scholl & Tremoulet, 2000). Ähnlich wie bei diesen verwandten Themen ziehen Scholl und Gao (2013) auch bei der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung domänenspezifische Erklärungen heran. Scholl und Gao (2013) heben hervor, dass die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung den anderen Wahrnehmungsphänomenen ähnelt. Die Autoren gehen aber nicht so weit, ein Modul (im Sinne von Fodor) zu postulieren. Scholl und Gao (2013) bezweifeln, dass es einen Detektor für die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung gibt. Stattdessen gehen die Autoren davon aus, dass zielgerichtete Bewegung durch die kontextbedingte Gewichtung mehrerer Informationsquellen (wie die Ausrichtung der Akteure oder die zeitliche Abstimmung deren Bewegung) zustande kommt. Frankenhuis, House, Barrett und Johnson (2013) postulieren, ähnlich wie Scholl und Gao (2013), dass Menschen domänenspezifische Prozesse verwenden, um zielgerichtete Bewegung zu erkennen. Anders als Scholl und Gao (2013), heben Frankenhuis et al. (2013) hervor, dass diese Prozesse als wissensbasierte Strategien verstanden werden sollen. Bingham, Schmidt und Rosen-

blum (1995) haben die Wahrnehmung lebewesenähnlicher Bewegung im Kontrast zu physikalischer Bewegung untersucht. Sie berichten, dass die Wahrnehmungsleistung der Beobachter durch Beachtung der Unterschiede der kinetischen Energie der Akteure erklärt werden kann.

Die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung sowie die angrenzenden Themen wurden auch in der Entwicklungspsychologie untersucht und theoretisch behandelt. Wie bereits erwähnt, wurde die Entwicklungspsychologie auch von Fodors Ideen beeinflusst und es überrascht daher nicht, dass sich auch hier die entwicklungspsychologischen Theorien anhand dessen klassifizieren lassen, wie viele domänenspezifischen Mechanismen postuliert werden. Zusätzlich zu den Fragen aus der Erwachsenenforschung beschäftigt sich die Entwicklungspsychologie mit der Frage, wie sich die kritischen Leistungen ontogenetisch entwickeln. Insbesondere für die Vertreter der domänenspezifischen Erklärungen stellt sich die Frage, wann und wie die domänenspezifischen Mechanismen wirksam werden.

Die Vertreter der Kernwissenstheorie postulieren, dass das Kernwissen angeboren ist (Carey, 2009). Laut Karmiloff-Smith (1995) ist es möglich, dass bestimmte Prozesse erst im Laufe der Entwicklung durch Übung „modularisiert“ werden. Gopnik et al. (1997) behauptet, dass das domänenspezifische Wissen erlernt wird. Thelen und Smith (1996) geht dagegen von wenigen domänenspezifischen Mechanismen aus. Laut Thelen und Smith (1996) können die von anderen Forschern postulierten domänenspezifischen Leistungen durch eine Interaktion der domänenallgemeinen Mechanismen wie Aufmerksamkeit oder Motorik erklärt werden.

Auch Entwicklungspsychologen haben sich mit der Entwicklung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung theoretisch auseinander gesetzt. Die meisten Studien fokussierten auf die Säuglinge (Frankenhuis et al., 2013; Gergely, Nádasdy, Csibra & Biro, 1995; Rochat, Morgan & Carpenter, 1997; Rochat, Striano, Morgan et al., 2004). Carey (2009) und Gergely und Csibra (2003) postulieren, dass Säuglinge bereits innerhalb des ersten Lebensjahres die Ziele von Akteuren anhand deren Bewegung erschließen können. Die Annahmen der Autoren unterscheiden sich im Ausmaß, in dem den Säuglingen konzeptuelles Wissen zugeschrieben wird. Carey (2009) geht davon aus, dass Säuglinge Akteure als Entitäten mit Zielen, Wahrnehmungen und Aufmerksamkeit verstehen. Gergely und Csibra (2003) nehmen dagegen an, dass Säuglinge über Strategien verfügen, die es ihnen ermöglichen, aus der Bewegungstrajektorie der Akteure Ziele zu erschließen und umgekehrt, anhand der Ziele die Bewegung vorherzusagen. Auch Frankenhuis und Barrett (2013) sprechen von domänenspezi-

fischen Strategien. Diese können laut der Autoren aber auch perzeptuell sein. Wie die Literaturübersicht zeigt, befindet sich der Forschungsbereich Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung an der Schnittstelle zwischen der domänenallgemeinen und der domänenspezifischen Theoriebildung. Es werden aber vorwiegend domänenspezifische Erklärungen herangezogen (Frankenhuis et al., 2013; Scholl & Gao, 2013). Die vorliegende Arbeit ergänzt die bestehende Forschung und fokussiert auf domänenallgemeine Erklärungen. An dieser Stelle seien bereits zwei solcher Erklärungen dargestellt.

Eine potentielle Erklärung bietet die Theorie von bottom-up Aufmerksamkeit (Itti & Koch, 2000). Falls die zielgerichtete Bewegung salienter ist als andere Bewegungsarten, dann wird diese Bewegung schneller entdeckt und länger und öfter angeschaut.

Eine andere domänenallgemeine Erklärung bietet die Annahme der Blickverfolgung. Um Objekte, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, besser betrachten zu können, wenden Menschen *Blickverfolgung* an (Barnes, 2008). Während der Blickverfolgung wird die Position und die Geschwindigkeit des Blickes an die Position und Geschwindigkeit des Zielobjekts gekoppelt. Blickverfolgung ist eine Art von Verfolgungsbewegung. Es ist damit wahrscheinlich, dass das Verfolgungsereignis einfacher verfolgt werden kann. Ähnlich wie Aufmerksamkeit kann die Blickverfolgung als ein Filter dienen, so dass Verfolgungsbewegung einfacher zu betrachten und zu beurteilen ist als andere, insbesondere zufällige Trajektorien. Da sich bei anderen Arten von zielgerichteter Bewegung die Akteure oft nahe beieinander befinden und sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, kann Blickverfolgung auch in diesen Fällen eine Erklärung bieten.

Auch falls domänenallgemeine Erklärungen bei Erwachsenen nicht zutreffen sollten, ist es dennoch denkbar, dass solche Erklärungen in der frühen Entwicklung relevant sind. Aufmerksamkeitsmechanismen und Mechanismen der Augenbewegungssteuerung reifen sehr früh in der Entwicklung, innerhalb des ersten Jahres (Johnson, 2011), und könnten somit die Leistungen der sich später entwickelnden domänenspezifischen Mechanismen übernehmen und/oder diese zumindest unterstützen und deren Entwicklung vorantreiben.

Mit der Nennung der domänenallgemeinen Erklärungen stellt sich die Frage, weshalb diese alternative Erklärungen von Vertretern domänenspezifischer Ansätze (Frankenhuis et al., 2013; Scholl & Gao, 2013) nicht abgeklärt wurden. In den übrigen Absätzen dieser Einleitung werden die empirischen Studien zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung kritisch diskutiert. Es wird gezeigt, weshalb diese Studien nicht geeignet

sind, domänenallgemeine Erklärungen auszuschließen. Aus der Diskussion wird ein alternatives methodologisches Vorgehen abgeleitet und durch eigene Studien, wie in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben, umgesetzt.

1.3 Drei Forschungsgenerationen

Die Literaturübersicht in diesem Teil fokussiert auf methodologische Aspekte, d.h., auf den Versuchsaufbau und auf die Auswertung in den Studien zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung. Viele Studien untersuchen Belebtheit sowie zielgerichtete Bewegung zusammen und verwenden bei beiden Themen dieselbe Methodologie. Aus diesem Grund wird in diesem Absatz zielgerichtete Bewegung zusammen mit Belebtheit diskutiert.

Die Studien von Heider und Simmel (1944) und Blythe et al. (1999) wurden bereits kurz erwähnt. Zur Erinnerung, in der Studie von Heider und Simmel (1944) wurden die Versuchspersonen instruiert, kurze Filmabschnitte einer, mit geometrischen Figuren dargestellten sozialen Interaktion zu beschreiben. In der Studie von Blythe et al. (1999) wurden die Versuchspersonen gebeten, die dargestellte Bewegung Kategorien wie Jagen, Umwerben oder Kämpfen zuzuordnen. Diese Studien zeigen, dass die Bewegung hinreichende Hinweisreize bietet, um eine zielgerichtete Handlung verlässlich zu erkennen. Diese Studien zeigen aber nicht, welche Aspekte der Bewegung für diese Erkennungsleistung kritisch sind. Ist die Entfernung der Akteure wichtig, oder eher die Bewegungsrichtung? Ist die Bewegung aller Akteure gleich wichtig oder wird ein bestimmter Akteur besonders beachtet? Ist die zeitliche Abstimmung der Bewegung der Akteure wichtig oder wird eher auf die Einzelbewegung geachtet?

Mit dem Ziel die kritischen Bewegungsmerkmale zu finden, variierten Tremoulet und Feldman (2000) die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Bewegungsrichtungsänderung. Die Autoren zeigten die geradlinige Bewegung eines kleinen Kreises. Sobald der Kreis die Bildschirmmitte erreichte, änderte er entweder die Bewegungsrichtung oder die Geschwindigkeit. Die Versuchspersonen schauten sich die Bewegung an und bewerteten, wie lebendig die Bewegung erscheint. Die Ergebnisse zeigten, dass eine rapide Geschwindkeitszunahme sowie größere Richtungsänderungen (größer im Sinne der absoluten Winkeldifferenz zwischen der Bewegungsrichtung vor und nach der Bewegungsänderung) als stärker belebt eingestuft wird.

In diesen Studien werden die Versuchspersonen um explizite Urteile gebeten, es wer-

den Beschreibungen der Bewegung, Einordnung zu einer Kategorie oder Bewertungen auf einer Rating-Skala erfragt. Bei Tremoulet und Feldman (2000, Seite 945) sollten die Versuchspersonen auf einer Skala von 1 (eindeutig nicht belebt) bis 7 (eindeutig belebt) beurteilen, wie belebt die Bewegung erscheint.

Die expliziten Urteilsmaße sind problematisch, da sie durch die Aufgabenanforderungen verfälscht werden können. Was passiert beispielsweise wenn die Versuchspersonen keine der in Tremoulet und Feldman (2000) gezeigten Bewegungen als besonders belebt einstufen, aber trotzdem eine Bewertung abgeben müssen? Die Versuchsperson wird die Skala über ihre ganze Breite ausnutzen wollen und damit wird sie auch Bewegung, die sie nicht als belebt empfindet, als belebt einstufen. Die Geschwindigkeit (oder Richtungsänderung) mag für die Wahrnehmung der Belebtheit eine geringere Rolle spielen. Da diese aber über die Trials hinweg variiert wird, liegt es für die Versuchspersonen nahe, ihre Bewertung an dieser Variation zu orientieren. Zudem steht die Verwendung der expliziten Urteilsmaße im Widerspruch zu der Theoriebildung bei Scholl und Tremoulet (2000), in welcher die Autoren domänenspezifische Mechanismen postulierten. Diese sollten automatisch, schnell und weitgehend unabhängig von dem reflektierten Urteil ablaufen. Es ist unklar, inwieweit explizite Maße die schnelle, unreflektierte und automatische Funktionsweise wiedergeben.

Ausgehend von dieser Kritik, stellten Gao et al. (2009) die impliziten Maße in den Mittelpunkt des Versuchsdesigns. Die Autoren untersuchten die Entdeckung von Verfolgungsbewegungen stellvertretend für zielgerichtete Bewegung. In Experiment 2 ihrer Studie zeigten sie den Versuchspersonen die Bewegung mehrerer Ringe (Akteure) auf einem Bildschirm. Alle bis auf einen Ring bewegten sich zufällig. Der vermeintliche Ring (Jäger) bewegte sich auf einen anderen Ring (Beute) zu. In einigen Trials wurde die Beute gezeigt, in anderen Trials wurde anstelle der Beute ein zusätzlicher Ring gezeigt. Der Jäger war zwar sichtbar, da aber die Beute fehlte, war keine Verfolgung erkennbar. Die Versuchsperson musste nach jedem Trial entscheiden, ob Verfolgung gezeigt wurde oder nicht. Mit diesem Versuchsdesign lässt sich testen, wie unterschiedliche Faktoren die Entdeckungsleistung beeinflussen. In Experiment 2 ihrer Studie haben Gao et al. (2009) gezeigt, dass die Leistung deutlich schlechter ausfällt, wenn sich der Jäger nicht genau auf die Beute zubewegt, sondern seine Bewegung leicht von der perfekt zielgerichteten Trajektorie abweicht. Das war der Fall, obwohl die nicht perfekt zielgerichtete Bewegung genug Hinweisreize bot um das Verfolgungspaar von den restlichen Ringen verlässlich zu unterscheiden. Die Zielgerichtetheit der Verfolgung ist damit ein wichtiger Faktor, der das Erkennen der Verfolgung unterstützt.

Neuere Forschung folgt Gao et al. (2009) und verwendet implizite Leistungsmaße (Gao et al., 2010; Gao & Scholl, 2011; Meyerhoff, Huff & Schwan, 2013; Meyerhoff et al., 2014b; Pratt, Radulescu, Guo & Abrams, 2010).

Die Literaturübersicht zeigt bestimmte Trends bei der Erforschung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung und der Belebtheit. Da sich diese Trends nacheinander abwechseln, kann man auch von drei Generationen sprechen. Die erste Generation verwendete maßgeschneiderte Filme. Das Ziel war, die Wahrnehmung der Belebtheit und der Zielgerichtetheit eindrücklich zu demonstrieren. Die zweite Generation (Scholl & Tremoulet, 2000) versuchte die Faktoren, welche diese Wahrnehmung unterstützen, zu bestimmen. Dazu wurden Bewegungsmerkmale systematisch variiert und die Versuchspersonen wurden nach einer Bewertung gefragt. Die dritte Generation (Gao et al., 2009) versucht ebenfalls die Einflussfaktoren zu bestimmen und variiert dazu die Merkmale der Verfolgung wie die Zielgerichtetheit der Bewegung (Gao et al., 2009), die Ausrichtung der Akteure (Gao et al., 2010) oder die Anzahl der Distraktoren (Meyerhoff et al., 2013). Anders als die erste und zweite Generation verwendet die dritte Generation implizite Leistungsmaße. Nachfolgend soll auf die Kritik an den früheren Generationen näher eingegangen werden.

1.4 Was sind die kognitiven Bausteine der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung?

Die zweite sowie die dritte Generation versuchen die Faktoren zu bestimmen, welche die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung beeinflussen. Diese Faktoren werden als Hypothesen in getrennten Experimenten oder sogar in getrennten Studien getestet. Woher aber kommen diese Hypothesen? Wie bestimmt der Forscher, dass die Studie die Geschwindigkeitsänderung anstelle des Abstands zwischen den Akteuren testen soll? Weshalb sollte eine abrupte Bewegungsänderung statt einer periodischen sinusoiden Bewegung getestet werden? Warum sollte ein isolierter Akteur und keine Gruppe dargestellt werden? Es ließe sich auf die Einfachheit der Stimuli verweisen, um solche versuchsbezogene Entscheidungen zu verteidigen. Geradlinige Bewegung ist einfacher zu gestalten als die sinusoiden Bewegung und ein Stimulus mit einem Akteur ist auch einfacher zu gestalten als ein Stimulus mit mehreren Akteuren. Was allerdings dem Forscher intuitiv als einfach erscheint, muss nicht notwendigerweise ein Grundmerkmal darstellen, das auch zur Erkennung der zielgerichteten Bewegung genutzt

wird. Bei der Erkennung zielgerichteter Bewegung oder Belebtheit ist es auch möglich, dass komplexe Muster (wie Annäherung oder parallele Bewegung) herangezogen werden. Was passiert wenn die Forscher solche komplexen Muster bei ihrem hypothesengeleiteten Vorgehen übersehen? Dies ist unproblematisch solange die getesteten Grundmerkmale von solchem komplexen Muster unabhängig sind. Dann enden die Tests der einfachen Bewegungsmerkmale mit einem negativen Ergebnis. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass ein komplexes Muster eine bestimmte Geschwindigkeit, Beschleunigung oder andere Grundmerkmale voraussetzt. Dann bestimmt die Ausprägung der Grundmerkmale auch die Ausprägung der komplexen Merkmale.

Ein weiteres Problem des hypothesengeleiteten Vorgehens wurde bereits von Gao et al. (2009) in ihrer Kritik der zweiten Generation angesprochen. In den Versuchen im Rahmen der zweiten Generation wird ein Merkmal systematisch variiert und die anderen Merkmale werden konstant gehalten oder randomisiert. Was passiert wenn die Versuchspersonen keines dieser Merkmale als belebt empfinden. Sie werden sich vermutlich an dem vom Versuchsleiter variierten Faktor orientieren. Dieses Problem betrifft auch die impliziten Maße. Gao et al. (2009) haben in einem Kontrollexperiment ihre Versuchspersonen instruiert, auf statistische Merkmale der Bewegung und nicht auf die Verfolgungsbewegung zu achten. Die Versuchspersonen wurden darüber aufgeklärt, wie die Verfolgungsbewegung algorithmisch erzeugt wird. Bei einem Vergleich zwischen der aufgeklärten und der unaufgeklärten Leistung wird deutlich, dass diese sehr ähnlich sind (man vergleiche die Abbildung 4a mit Abbildung 6a in Gao et al., 2009). Die Versuchspersonen erhalten nach jedem Trial eine Rückmeldung. Damit bekommen sie auch die Möglichkeit, über die statistischen Regelmäßigkeiten zu lernen, die zu einer erfolgreichen Antwort führen. Eine Beachtung der Verfolgung ist nicht notwendig. Das Lernen kann dabei auch implizit geschehen (Perruchet & Pacton, 2006), so dass den Versuchspersonen nicht bewusst wird, welche Merkmale sie für die erfolgreiche Entdeckung verwenden. Es ist dann weitgehend irrelevant, welche Merkmale die kognitiven Mechanismen tatsächlich nutzen. Die Versuchspersonen werden sich an den Merkmalen, die ihnen der Versuchsleiter anbietet, orientieren. Das hypothesengeleitete Vorgehen kann dazu führen, dass die kognitiven Bausteine nicht richtig identifiziert werden. Erstens kann man nicht annehmen, dass die einfachen Merkmale, die durch den Forscher für die Untersuchung ausgewählt wurden von den komplexen Mustern, die zur Erkennung herangezogen werden, unabhängig auftreten. Zweitens es ist möglich, dass sich die Versuchspersonen an der Verteilung der statistischen Merkmale orientieren um ein verlässliches Kriterium für die Ent-

deckung zu finden. Auch unter der Annahme, dass die bereits genannten Kritikpunkte nicht zutreffen, ist es zudem denkbar, dass die intuitive Auswahl der Hypothesen trotzdem beliebig, ad-hoc, im besten Fall zufällig (und damit ineffizient ist, siehe Newell, 1973), im schlimmsten Fall einseitig und verzerrt. Die Freiheitsgrade bei der Auswahl der Hypothesen und der untersuchten Merkmale betreffen nicht nur die Erforschung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung. Diese Freiheitsgrade geben eine mögliche Erklärung dafür, weshalb es Unterschiede bei der Theoriebildung gibt; insbesondere in Hinsicht auf die Frage wie viele domänenspezifischen Mechanismen postuliert werden. In dem Absatz 2.3.7 wird ein experimentelles Vorgehen vorgestellt, dass die Merkmale systematisch variiert und eine Verzerrung durch die Entscheidungen der Versuchsleiter ausschließt oder zumindest die Wahrscheinlichkeit für eine solche Verzerrung vermindert. Zuvor soll jedoch noch ein weiteres Problem der früheren Forschungsgenerationen angesprochen werden.

1.5 Überlegungen zur Stimulus- und Aufgabengestaltung

Wie bereits im Absatz 1.2 erwähnt, vertreten Scholl und Tremoulet (2000) und Scholl und Gao (2013) die Ansicht, dass die Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung domänenspezifisch sind. Der Einfluss der domänenallgemeinen Aufmerksamkeitsmechanismen, Augenbewegungen, Lernmechanismen und Entscheidungsprozessen wird zwar anerkannt, diese Faktoren werden aber als Störquellen betrachtet. Anstatt sie in die Überlegungen einzubinden, wird versucht, diese Faktoren experimentell auszuschalten. Das tragende Argument in diesem Absatz soll sein, dass eine solche Ausschaltung im Grundsatz nicht möglich ist. Um die kognitiven Mechanismen anzutreiben, muss der Stimulus durch Aufmerksamkeitsprozesse entdeckt werden und der Stimulus muss mit Augenbewegungen abgetastet werden. Um eine kognitive Funktion messen zu können muss eine Aufgabe gestellt werden, welche diese kognitive Funktion beansprucht. Eine solche Aufgabe schließt wiederum Entscheidungs- und Lernprozesse ein. Damit ist es immer möglich, zu domänenspezifischen Interpretationen auch alternative domänenallgemeine Erklärungen zu konstruieren. Solche alternative Erklärungen wurden bereits zum Ende des Absatz 1.2 vorgestellt. An dieser Stelle werden diese Erklärungen konkret anhand der Ergebnisse in Gao et al. (2009) illustriert.

Wenn eine sich zufällig bewegende Beute durch einen Jäger, welcher sich immer auf die Beute zubewegt, verfolgt wird, führt dies dazu, dass der Jäger die Beute schnell einholt und dann in der Nähe der Beute bleibt. Die Beute und der Jäger bleiben nahe beieinander und fallen damit schneller auf (Itti & Koch, 2000) als die restlichen (sich zufällig bewegenden) Akteure, deren durchschnittlicher Abstand deutlich größer ist. Gao et al. (2009) haben versucht, solche einfachen und schnellen Entdeckung zu vermeiden, indem sie den Mindestabstand zwischen dem Jäger und der Beute auf 5 Grad einschränkten. Zur Konstruktion solcher Stimuli werden die Koordinaten der Akteure schrittweise erzeugt, so dass ein Schritt einem Bild entspricht. Der Algorithmus wird immer dann, wenn der Abstand zwischen dem Jäger und der Beute 5 Grad unterschreitet, ein Paar Schritte zurück gestellt. Nach dem Zurückstellen wird der Algorithmus weiter ausgeführt - entweder, bis die Mindestentfernung wieder unterschritten wird oder, bis die erzeugte Bewegung die gewünschte Dauer erreicht hat. Allerdings verzerrt diese selektive Prozedur einige Grundeigenschaften der Bewegung des Jägers und der Beute. Die Bewegung der Beute ist flüssiger. Die Beute macht weniger Bewegungsänderungen als die Distraktoren. Die Winkel bei der Bewegungsänderung der Beute folgen nicht mehr einer Gleichverteilung. Fließende Bewegungsänderungen kommen häufiger vor. Der Jäger macht seltener Bewegungsänderungen als die Distraktoren. Beute und Jäger bewegen sich meist in einem Kreis am äußeren Rand des Bewegungsraums. Wenn es zu Bewegungsänderungen bei dem Verfolgungspaar kommt, entstehen diese oft durch Berührung des äußeren Randes. Um das Verlassen des Bewegungsraums (und evtl. der Bildschirmfläche) zu vermeiden, werden die Akteure (Beute, Jäger sowie Distraktoren) bei Randberührung wie ein physikalischer Gegenstand abgestoßen. Das häufige Abprallen der Beute und des Jägers erzeugt zuweilen den Eindruck zweier Billiardbälle. Ein Beispiel dafür kann man in einem Film mit den Stimuli aus Gao et al. (2009) beobachten: <http://tinyurl.com/nqt6rar>. Eine unmittelbare Folge ist, dass sich der Jäger und die Beute von den Distraktoren in diesen Grundmerkmalen unterscheiden. Die aufgelisteten Unterscheidungsmerkmale könnten als Stütze für die Verfolgungsentdeckung durch domänenallgemeine Mechanismen dienen. Die Forscher versuchen diese Möglichkeit auszuschließen, indem sie Kontrollexperimente durchführen, bei denen dieselben Stützen angeboten werden ohne jedoch eine Verfolgung zu zeigen. Ein gutes Beispiel dafür gibt Experiment 3 in Gao et al. (2009). Hier wurden die Beobachter aufgefordert, eine rückwärts abgespielte Verfolgungsbewegung zu finden. Die Entdeckungsleistung war hierbei schlechter, als bei der Präsentation der originalen, vorwärts abgespielten Verfolgungsbewegung. Dieses Kon-

trollexperiment scheint eine sehr gute Kontrollbedingung darzustellen. Die rückwärts abgespielte Bewegung hat dieselben Bewegungseigenschaften wie die originale Bewegung. Lediglich die zeitliche Abfolge dieser Eigenschaften ist verändert. Dem Einsatz dieser Kontrollbedingung liegt die Annahme zugrunde, dass es eine domänenallgemeine Erklärung ausschließt. Hierbei ist jedoch kritisch anzumerken, dass auch die Ergebnisse aus Experiment 3 in Gao et al. (2009) alternativ erklärt werden können. Die Bewegungsänderung des Jägers ist nicht randomisiert. Vielmehr bewegt er sich immer zur Beute hin. Bei eingeschränktem Abstand ist seine Bewegung flüssiger als die Bewegung der Beute. Es ist plausibel anzunehmen, dass die Beobachter während der Suche die Paare mit ihrem Blick verfolgen. Anhand der Ergebnisse von Fehd und Seiffert (2010) ist zu vermuten, dass die Versuchspersonen ihren Blick zwischen den zwei Akteuren positionieren. Damit haben sie die beiden Akteure gut in Sicht. Der Blick geht mit beiden Akteuren mit. Wenn der hintere Akteur (der Jäger) eine Bewegungsänderung zur Seite macht, geht er schneller verloren als der vordere Akteur (die Beute). Die Bewegung des Jägers ist allerdings einfacher im Blick zu halten, da er sich flüssiger bewegt als die Beute. Was passiert wenn die rückwärts abgespielte Verfolgungsbewegung beobachtet wird? Diesmal ist der Jäger vorne und die Beute hinten. Diese Bewegung ist insgesamt schwieriger mit dem Blick zu verfolgen, da der schwierigere Akteur an der schwierigen vorderen Position gezeigt wird. Die unterschiedliche Schwierigkeit der Beobachtung kann die schlechtere Entdeckungsleistung bei der rückwärts abgespielten Verfolgung erklären. Wenn die Akteure nicht gut verfolgt und beobachtet werden können, verbleibt weniger Zeit für die Beurteilung der Bewegung der Akteure. Dann fällt auch die Entscheidung, ob die Verfolgung präsentiert wurde oder nicht, schwieriger aus, da nicht genug Eindrücke gesammelt wurden. Aus Sicht des Versuchsleiters wäre es denkbar, die Augenbewegungen zu vermeiden, indem die Versuchsperson instruiert wird, auf die Bildschirmmitte zu schauen (wie zum Beispiel bei Pratt et al., 2010). Es stellt sich aber die Frage, ob damit das interessierende Phänomen nicht zerstört wird. Es fällt schwer, sich Kontexte vorzustellen, in denen eine Entdeckung von Verfolgungsbewegungen ohne Blickbewegungen vorkommt. Es scheint für Menschen natürlicher, sich bewegende Objekte mit dem Blick zu verfolgen.

Wenn sich die Bewegungseigenschaften nicht vollständig experimentell kontrollieren lassen, stellt sich die Frage, ob es überhaupt möglich ist, domänenspezifische Mechanismen erschöpfend zu untersuchen. Anstatt diese experimentell zu kontrollieren, können die konfundierenden Variablen in der Auswertung kontrolliert werden. Wie

das geschehen kann, wird anhand eines Beispiels illustriert. Klein, Zwickel, Prinz und Frith (2009) berichteten, dass die den Akteuren gewidmete Fixationszeit höher ausfällt, wenn deren Bewegung zielgerichtet ist. Diese Fixationszeit ist höher im Vergleich zu einer Bedingung, die zufällige Bewegung zeigt. Bei Klein et al. (2009) handelte es sich um maßgeschneiderte Stimuli nach der Art der ersten Generation. Wie bei den anderen Forschungsgenerationen besteht auch hier die Gefahr, dass die Unterschiede in den Grundeigenschaften zwischen den Bedingungen die beobachteten Unterschiede in der Fixationszeit verursachen. Tatsächlich ist der Abstand zwischen den zielgerichteten Akteuren kleiner. Roux, Passerieux und Ramus (2013) haben gezeigt, dass der Unterschied in der Fixationszeit verschwindet, wenn man den Abstand statistisch kontrolliert. Roux et al. (2013) haben ein alternatives Fixationsmaß vorgeschlagen. Sie haben gezeigt, dass die Ergebnisse der Analyse mit diesem Maß nicht durch den Abstand der Akteure verfälscht werden.

1.6 Entwicklung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung

In den vorangegangenen beiden Absätzen wurden zwei methodologischen Probleme der früheren Forschungsgenerationen aufgezeigt:

- Die Ergebnisse können durch die Wahl der Fragestellung, der Hypothesen und der Stimuli verzerrt werden.
- Die Grundeigenschaften der Stimuli können nicht vollständig experimentell kontrolliert werden. Damit sind die Aussagen zu domänenspezifischen Mechanismen der Verfolgungsentdeckung schwer zu belegen.

Es überrascht nicht, dass beide Probleme auch bei den entwicklungspsychologischen Studien gegeben sind. Hier wurden diese bereits von einigen Forschern thematisiert und es lohnt der Blick auf die Entwicklungsforschung zum Thema Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung. Wie in den vorigen Absätzen zur Erwachsenenforschung wird zuerst eine Forschungsübersicht mit dem Augenmerk auf den Versuchsaufbau und die Auswertung gegeben. Anschließend wird diese Forschung kritisch diskutiert.

Säuglinge können schwerlich mit Bewertungsskalen befragt werden. Das Dilemma, das den Übergang von der zweiten zur dritten Forschungsgeneration geprägt hat, greift

daher nicht im Bereich der Säuglingsforschung. Säuglingsforscher sind und waren stets an implizite Verhaltensmaße gebunden. Das wohl am häufigsten eingesetzte Paradigma bei der Untersuchung von Säuglingen und Kleinkindern ist das Habituationparadigma. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Säuglinge bei einer Präsentation interessanter, neuer und überraschender Ereignissen längere Blickzeiten aufweisen als bei der Präsentation uninteressanter Ereignissen. Die Versuchsanordnung besteht folglich aus zwei Phasen. Während der Habituationsphase wird ein Ereignis wiederholt gezeigt, bis die Blickzeiten der Säuglinge unter einen bestimmten Wert sinken. In der anschließenden Testphase wird ein abgeändertes Ereignis gezeigt. Falls die Säuglinge die Änderung bemerkt haben, zeigen sie längere Blickzeiten. Andernfalls bleibt die Dauer der Blickzeiten erhalten beziehungsweise sinkt weiter.

Auf diese Art und Weise habituierten Dasser, Ulbaek und Premack (1989) 3-jährige Kinder an Interaktionen von zwei geometrischen Figuren. Dabei handelte es sich wie bei der ersten Forschungsgeneration um maßgeschneiderte Stimuli. Ein Beispiel für eine solche Interaktion ist: A rückt zu B, B schiebt A weg, A rückt wieder zu B und B flüchtet. Als Test wurde den Kindern in der Experimentalgruppe eine Interaktion mit ähnlichen Bewegungseigenschaften gezeigt. Die Bewegung war jedoch zeitlich nicht gekoppelt. Die Kinder der Kontrollgruppe sahen in der Testphase eine andere Bewegung mit gekoppelter Interaktion. Die Kinder in der Experimentalgruppe zeigten längere Blickzeiten als die Kinder in der Kontrollgruppe. Laut den Autoren zeigt dieses Ergebnis, dass die zeitliche Koppelung der Bewegung für die Kinder ein salientes Unterscheidungsmerkmal darstellt.

Rochat et al. (1997) verwendeten anstelle des Habituationsverfahrens ein anderes Paradigma um die Wahrnehmung der Verfolgungsbewegung bei 3 und 6 Monate alten Säuglingen zu untersuchen. Die Autoren zeigten den Säuglingen zwei maßgeschneiderte Bewegungsabschnitte. Die Abschnitte wurden auf zwei nebeneinander positionierten Bildschirmen gleichzeitig präsentiert. Jeder Bildschirm zeigte die Bewegung zweier Kreise. Auf einem der Bildschirme verfolgten sich die Kreise. Auf dem anderen Bildschirm wurde eine zufällige Bewegung gezeigt. Es wurde ermittelt, auf welchen Bildschirm die Säuglinge länger schauten. Die Gruppe der 3 Monate alten Säuglinge zeigte eine Präferenz für die Verfolgung, während die 6 Monate alten Säuglinge, sowie eine zusätzliche Gruppe von Erwachsenen länger auf die zufällige Bewegung schauten. Für die Erwachsenen war die zufällige Bewegung interessanter, da die Verfolgungsbewegung vorhersagbar und damit uninteressant war. Ähnlich interpretierten die Autoren auch die Präferenz der 6 Monate alten Säuglinge. Umgekehrt war die

Verfolgung für die 3 Monate alten Säuglinge salienter, weil sie die zufällige Bewegung nicht interpretieren und enkodieren können.

Ähnlich zu Rochat et al. (1997) zeigten Frankenhuys et al. (2013) 4 und 10 Monate alten Säuglingen zwei Bewegungen nebeneinander. Es wurde gemessen, auf welche Bewegung die Säuglinge länger schauten. Wie bei Rochat et al. (1997) zeigte ein Bildschirm die Verfolgung. Der andere Bildschirm zeigte eine kausale mechanische Bewegung. Die Verfolgung wurde länger beobachtet. Die Autoren untersuchten nachfolgend, welche Verfolgungsmerkmale die längeren Blickzeiten bewirkten. Die Verfolgungsbewegung unterschied sich von der mechanischen Bewegung bezüglich dreier Merkmale: die Beschleunigung der Akteure, die Häufigkeit der Bewegungsänderungen und die Zielgerichtetheit der Bewegung. Es wurden Stimuli erstellt, bei denen jeweils nur eines dieser drei Verfolgungsmerkmale auftritt. Diese Stimuli wurden jeweils paarweise zusammen mit einer mechanischen Kontrollbewegung gezeigt. Die beschleunigten und die zielgerichteten Stimuli wurden jeweils länger angeschaut. Akteure mit häufigeren Bewegungsänderungen wurden nicht länger als die Kontrollbewegung angeschaut.

Die Säuglinge können die zielgerichtete Bewegung nicht nur als solche erkennen, sondern sie nutzen diese Information, um Ziele und Handlungen der Akteure zu bestimmen. Diese Leistungen werden oft zusammen mit der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung studiert. Beispielhaft soll auf eine dieser Studien hier kurz genannt werden. Gergely et al. (1995) zeigten 7 Monate alten Säuglingen zwei Kreise, jeweils einen links und einen rechts auf einem Bildschirm. Ein Rechteck (Hindernis) stand in der Mitte zwischen beiden Kreisen. Einer der Kreise sprang über das Hindernis, um zu dem anderen Kreis zu gelangen. Die Säuglinge wurden an dieses Ereignis habituieret. Danach wurde ihnen dasselbe Ereignis des springenden Kreises gezeigt, diesmal jedoch ohne das Hindernis in der Mitte. Die Säuglinge schauten in dieser Testphase länger als im letzten Habituationdurchgang. Allerdings bleibt unklar, ob die Säuglinge die ineffiziente Bewegung der Akteure (Sprung ohne Hindernis) überraschend fanden, oder ob sie wegen des fehlenden Hindernisses länger schauten. Dazu untersuchten die Autoren eine zusätzliche Kontrollgruppe von Säuglingen. Bei dieser Gruppe fehlte das Hindernis auch in den Habituationstrials. Der Kreis nutzte diesmal den direkten Weg, um zu dem zweiten Kreis zu gelangen. Die Blickzeiten in dieser Kontrollgruppe waren kürzer als in der anderen Gruppe. Die Säuglinge fanden die geringere Effizienz der Bewegung überraschender als die geänderte Umgebung und/oder die geänderte Bahn. Die Autoren schlußfolgerten, dass die Säuglinge den Sprung über das Hinder-

nis in der Habituerungsphase als eine rationale Handlung enkodierten. Entsprechend sind sie überrascht, wenn der Akteur in der Testphase einen ineffizienten Weg wählt. An dieser Stelle seien die beiden Kritikpunkte aus der Diskussion um die drei Forschungsgenerationen wieder aufgegriffen. Zum einen gilt es zu klären, wie bestimmt werden soll, welche Bewegungsmerkmale variiert werden, um die Verfolgungsbewegung darzustellen. Die Anzahl der Trials, die den Säuglingen präsentiert werden kann, ist stark begrenzt. Damit lassen sich nur wenige Faktoren variieren. Zum anderen stellt sich die Frage, wie die Grundeigenschaften der Bewegung kontrolliert werden können. Diese Frage ist auch bei der Säuglingsforschung relevant, da die Ergebnisse in Rochat et al. (1997) und Frankenhuys et al. (2013) als Belege für domänenspezifische Wahrnehmungsmechanismen bei Säuglingen interpretiert werden. In diesen Studien wird versucht, die Grundeigenschaften der Bewegung wie Geschwindigkeit und Abstand mit Hilfe von Kontrolltrials experimentell zu kontrollieren. Die Kontrollbewegung weist eine ähnliche Verteilung der Grundeigenschaften auf wie die Verfolgung. Zum Beispiel kontrollierten Rochat et al. (1997) die Häufigkeit der Bewegungsänderung, die Beschleunigung sowie den durchschnittlichen Abstand. Leider ist nicht bekannt, wie die Kontrollbewegung erzeugt wird (Dasser et al., 1989; Rochat et al., 1997) und/oder die Kontrolle ist nicht vollständig (Frankenhuys et al., 2013; Rochat et al., 1997). Beispielsweise wurde bei Rochat et al. (1997) und Frankenhuys et al. (2013) der Winkel der Bewegungsänderung nicht kontrolliert. Bei Rochat et al. (1997) waren die Bewegungsänderungen der Beute und des Jägers abgestimmt und folgten zeitnah aneinander. Die Bewegung der Kontrollstimuli war dagegen unabhängig. Dieser Unterschied kann zu einer höheren Saliens der Verfolgungsbewegung führen.

Ähnlich skeptisch hinsichtlich der Kontrolle sind auch andere Autoren, die den problematischen Rückschluss von den Blickzeiten auf die kognitiven Mechanismen und das Wissen der Säuglinge diskutiert haben (Aslin, 2007; Sirois & Jackson, 2007; Tafreshi, Thompson & Racine, 2014). Die Möglichkeit, dass die Säuglinge kleine perzeptuellen Hinweisreize verwenden um die berichteten Blickzeitmuster zu erzeugen, kann laut Sirois und Jackson (2007) nicht ausgeschlossen werden. Laut dieser Autoren kann bei den Habituerungsversuchen immer eine perzeptuelle Erklärung post-hoc konstruiert werden. Konkret greifen Sirois und Jackson (2007) die Ergebnisse von Gergely et al. (1995) auf. Laut Gergely et al. fanden die Säuglinge das Ereignis ohne Sprung und ohne Hindernis weniger überraschend als das Ereignis mit Sprung und ohne Hindernis. Dieses Ergebnis kam zustande obwohl die Säuglinge in der Habituerung das

Ereignis mit Sprung und mit Hindernis sahen und damit in Bezug auf die Anzahl der perzeptuellen Veränderungen (zwei vs. eine) das Ereignis ohne Sprung und ohne Hindernis eigentlich unähnlicher/überraschender sein sollte. Laut Sirois und Jackson (2007) kann es gleichwohl sein, dass das Ereignis mit zwei Veränderungen (ohne Sprung und ohne Hindernis) so unähnlich ist, dass die Säuglinge dieses ignorieren, weil sie die zwei Veränderungen nicht verarbeiten können, was ihnen jedoch bei einer Veränderung (mit Sprung und ohne Hindernis) noch gelingt.

Das Beispiel illustriert die beiden, im vorigen Absätzen diskutierten Probleme. Die a priori Wahl der Hypothese kann die Ergebnisdarstellung verzerren und auch die Kontrollexperimente und andere Kontrollmaßnahmen sind nicht geeignet, die Möglichkeit einer alternativen domänenallgemeinen Erklärung auszuschließen. Sirois und Jackson (2007, s. 60-61) kontrastieren eine hypothesen-geleitete top-down Forschung mit einer daten-basierten bottom-up Forschung und sprechen sich für einen stärkeren Einsatz der letzteren Forschungsstrategie. Die Auswahl der Faktoren die getestet werden, solle daten-basiert statt hypothesen-geleitet erfolgen. Die Autoren versprechen sich eine bessere Unterstützung der aus den Daten abgeleiteten Schlußfolgerungen durch präzisere und inhaltsreichere Meßmethoden wie Electroencephalographie oder Nahinfrarotspektroskopie.

Aslin (2007) wies ebenfalls auf die Probleme der Habituerungsmaße hin. Aslin (2007) empfahl (unter anderem) die zusätzliche Verwendung des Eyetrackings um das Blickverhalten zu erfassen. Laut Aslin (2007) erlaubt Eyetracking „die Mikrostruktur der Blickzeiten“ zu erfassen. Der detailliertere Einblick in das Blickverhalten hilft dabei, die Rolle der domänenallgemeinen Faktoren besser zu verstehen. Folglich ließe sich auch eine domänenspezifische Interpretation durch solche Ergebnisse besser abgrenzen. Sirois & Jackson folgen Aslins Empfehlungen. In ihren neueren Arbeiten wenden diese Autoren Eyetrackingverfahren an (Sirois & Jackson, 2012).

Nachfolgend sollen konkrete Ansätze vorgestellt werden, die eine Lösung für die beiden genannten Probleme versprechen. Die Vorschläge von Aslin (2007) und Sirois und Jackson (2007) finden hierbei Berücksichtigung.

1.7 Analyse von Muster- und Klassifizierungsbildern.

Innerhalb der Neurophysiologischen Forschung stellt sich häufig die Frage, wie bestimmt werden kann, welcher Stimulus die stärkste neuronale Reaktion erzeugt. Dieser Frage kann über eine hypothesen-geleitete Strategie nachgegangen werden. Man testet,

misst und vergleicht nacheinander die Reaktion des Neurons zu einem Stimulus mit senkrechten Linien, T-geformten Kanten, Buchstaben des Alphabets, Ellipsen, Herzkonturen, Hauskonturen und so weiter. Es gibt eine unendliche Anzahl an Merkmalen die variiert werden können. In der Neurophysiologie wurden effizientere Methoden entwickelt um den stärksten Stimulus zu bestimmen (Ringach & Shapley, 2004). Es wird die neuronale Reaktion bei einer Anzahl von Bildern gemessen, die zufälliges Rauschen zeigen. Es wird analysiert, wie stark die neuronale Reaktion mit den Stimuluseigenschaften zusammenhängt. Das einfachste Vorgehen ist, alle Bilder bei denen das Neuron gefeuert hat zu mitteln. Daraus resultiert ein Musterbild. Ein anderes Musterbild resultiert durch Mittelung derjenigen Stimuli, bei denen das Neuron *nicht* gefeuert hat. Durch das Abziehen beider Musterbilder voneinander, läßt sich ein weiteres Bild berechnen (auch *rezeptives Feld* genannt), welches die für die neuronale Reaktion entscheidenden visuellen Merkmale beschreibt. So zeigte zum Beispiel Ringach, Hawken und Shapley (2002), dass die rezeptiven Felder der Neuronen im primären visuellen Kortex von Makaken durch zweidimensionelle Gabor Funktionen beschrieben werden können. Neuronen mit solchen rezeptiven Feldern eignen sich gut zur Erkennung von Objektkanten.

Dieses Vorgehen aus der Neurophysiologie wurde in die Psychophysik übernommen und angepasst. Anstatt die neurale Reaktion zu messen, wird das Verhalten von Versuchspersonen quantifiziert. So wurden beispielsweise die Versuchspersonen in Solomon (2002) aufgefordert, eine zweidimensionelle Gauß-Glocke in verrauschten Bildern zu erkennen. Die berechneten rezeptiven Felder zeigten, dass die Versuchspersonen zur Erkennung gabor-basierte Kantenentdeckungsmechanismen verwenden. Allerdings wird das berechnete Bild nicht rezeptives Feld genannt, vielmehr ist die Bezeichnung *Klassifizierungsbild* (Eckstein & Ahumada, 2002; Victor, 2005) oder auch *perzeptives Feld* (Kienzle, Franz, Schölkopf & Wichmann, 2009; Neri & Levi, 2006) üblich. In der vorliegenden Arbeit sollen sie Klassifizierungsbilder genannt werden. Die Zwischenergebnisse die die beiden Stimulusgruppen beschreiben, werden Musterbilder genannt. Es gibt mehrere Methoden zur Berechnung der Klassifizierungsbilder. Das Mitteln und Abziehen ist die einfachste Methode. Die Methode der umgekehrten Korrelation ist die populärste (Neri & Levi, 2006). Alternative Klassifizierungsverfahren aus der Statistik und dem Maschinellen Lernen wurden ebenfalls vorgeschlagen (Victor, 2005) und umgesetzt (Kienzle et al., 2009). In dieser Arbeit werden alle diese Methoden als *Musteranalysen* bezeichnet.

Viele Studien der dritten Forschungsgeneration verwenden Aufgaben mit dem Ziel,

ein Verfolgungsereignis zu entdecken (Gao et al., 2009; Gao & Scholl, 2011; Meyerhoff et al., 2014a, 2014b). Solche Entdeckungsaufgaben eignen sich gut für Musterbildanalysen. Es werden die Musterbilder derjenigen Trials, in denen die Versuchsperson eine Verfolgung angibt, mit denjenigen Trials verglichen, in denen keine Verfolgung angibt. Anders als bei den üblichen Musteranalysen, sind die Stimuli, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden dynamisch. Die Ergebnisse der Musterbildanalysen sind entsprechend keine Bilder sondern kurze Filme. Da die Stimuli dynamisch sind, ist es vorteilhaft, die Entscheidung über den den Zeitpunkt der Entdeckung den Versuchspersonen zu überlassen (wie in Meyerhoff et al., 2014b) anstatt Trials von konstanter Länge darzubieten (wie in Gao et al., 2009). Die genaue zeitliche Verankerung im ersteren Fall ermöglicht eine genauere Bestimmung der dynamischen Aspekte der Musterfilme. Es wird mit Hilfe von Musteranalysen untersucht, welche Bewegungsmerkmale kurz vor der Entscheidung vorliegen.

Die Musteranalysen scheinen auf den ersten Blick die Probleme des hypothesengeleiteten Ansatzes zu beheben. Leider lässt sich das Vorgehen aus der Neurophysiologie nicht eins zu eins auf die psychologische Forschung anwenden. In psychologischen Studien ist es nicht sinnvoll einfach nur Rauschen zu präsentieren. Es muss zumindest eine Aufgabenstellung für die Versuchspersonen gegeben sein. Man könnte zwar Rauschen präsentieren und die Versuchspersonen fragen, ob das Rauschen eine Verfolgung zeigt. Im Falle zielgerichteter Bewegung ist es unwahrscheinlich, dass die kritischen komplexen Bewegungsmuster durch einen Zufallsalgorithmus erzeugt werden. Wenn keine Verfolgung gezeigt wird, kommt es selten zu Entdeckungen oder die Versuchsperson verfälscht ihre Antworten. Sobald eine Wahl der Stimuli und der Aufgabe notwendig wird, lässt sich die Kritik der zweiten und der dritten Generation auch auf die Musteranalysen anwenden.

In der Literatur zu Musteranalysen sind diese Probleme erkannt und Lösungen vorgeschlagen worden (Neri & Levi, 2006). Es werden an dieser Stelle zwei Lösungsansätze näher betrachtet. Der erste Lösungsansatz (Solomon, 2002) sieht vor, die Muster, die zu einer optimalen Lösung der Aufgabe führen würden zu bestimmen. Dazu werden die Stimuli in zwei Gruppen eingeteilt. Anders als bei den üblichen Musteranalysen, erfolgt dies nicht anhand der Antworten der Versuchsperson, sondern abhängig davon, ob es sich um ein Trial handelt in dem das Ziel (z. B. die Verfolgungsbewegung) vorkommt oder nicht. Es wird dann eine zweite Musteranalyse mit dieser alternativen Gruppenaufteilung durchgeführt. Die Klassifizierungsbilder beider Musteranalysen werden miteinander verglichen. Wenn diese voneinander abweichen, dann hat

die Versuchsperson nicht die statistischen Merkmale der Stimuli identifiziert, die eine optimale Lösung erlauben. Es ist eher plausibel, dass die Versuchsperson auf die Verfolgung geachtet hat und deswegen die Aufgabe suboptimal gelöst hat. D.h., wenn die Versuchsperson die Aufgabe suboptimal löst, dann ist es unwahrscheinlich, dass ihr Verhalten die Stimulus- und Aufgabenanforderungen widerspiegelt.

Eine andere Möglichkeit, eine Verzerrung durch Versuchsleiter-Erwartungen zu vermeiden, ist es, die Stimuli und die Aufgabe so auszuwählen, dass die Aufgaben dem natürlichen und ökologischen Kontext entsprechen, in welchem die untersuchte Leistung (zum Beispiel eine Entdeckung der Verfolgung) benötigt wird. Solche natürlichen Aufgaben sind jedoch häufig komplex, so dass für eine Musteranalyse fortgeschrittene Auswertungsverfahren benötigt werden. Um ein Beispiel zu nennen, verwendeten Kienzle et al. (2009) eine Support Vector Machine um die Klassifizierungsbilder zu berechnen. Die Stimuli in dieser Studie waren natürliche Bilder.

Musteranalysen bieten eine Lösung für das erste Problem, dass bei der Kritik der Forschung zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung festgestellt wurde: Wie wählt man Hypothesen, Stimuli und Aufgaben so dass diese Wahl die Ergebnisse nicht verzerren. In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie die Musteranalysen eine Lösung für dieses Problem bieten. Allerdings wurde auch gezeigt, dass bei der psychologischen Adaptation der Musteranalysen die Stimuluswahl zum Problem gerät. In dieser Hinsicht bietet die Literatur zu Musteranalysen Strategien um den Einfluss der Stimuluswahl auf die Leistung der Versuchspersonen zu untersuchen und zu vermindern. Der Vergleich der Musteranalysen der Stimuli mit den Musteranalysen der Versuchspersonen bietet dabei eine bessere Strategie als die Verwendung natürlicher Stimuli. Im Falle der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung ist es nicht klar, wie eine natürliche Darstellung der zielgerichteter Bewegung aussehen sollte. Die Erforschung der natürlichen Kontexte zielgerichteter Wahrnehmung bleibt der künftigen Forschung überlassen.

Wie in der Psychophysik wurden auch bei der Erforschung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung im Rahmen der dritten Generation Entdeckungsaufgaben verwendet. Diese Entdeckungsaufgaben lassen sich mit Musteranalysen kombinieren. Musteranalysen benötigen eine hohe Anzahl an Datenpunkten um robuste Ergebnisse zu erzielen. Damit sind die Musteranalysen für einen Einsatz in der Säuglingsforschung ungeeignet. Hier muss zunächst noch auf den üblichen hypothesen-geleiteten Ansatz zurückgegriffen werden.

1.8 Blickbewegungen und Eyetracking

Als nächstes soll die Lösung für das zweite Problem vorgestellt werden. Zur Erinnerung, es wurde festgestellt, dass die Grundeigenschaften der Stimuli nicht vollständig experimentell kontrolliert werden können. Der Grundgedanke des Lösungswegs ergibt sich weitgehend aus der vorangegangenen Literaturübersicht. Roux et al. (2013) zeigten, dass statistische Kontrolle eine Alternative zur experimentellen Kontrolle bietet. In Bezug auf das Versuchsdesign stellt sich dennoch die Frage, welche Kontrollvariablen gemessen werden sollen. In der vorliegenden Arbeit wird die Empfehlung von Aslin (2007) befolgt und Eyetracking eingesetzt um die Blickbewegungen der Versuchspersonen aufzunehmen.

Eyetracker messen die Position des Blickes auf einem Bildschirm. Aus den Blickdaten werden Sakkaden, Fixationen und fließende Augenbewegungen extrahiert (Salvucci & Goldberg, 2000). Die Sakkaden können unterschiedlichen Zwecken dienen. Explorative Sakkaden verschieben den Blick über weite Strecken, um andere Akteurgruppen schnell in den Blickpunkt zu bringen (Kowler, Anderson, Doshier & Blaser, 1995). Aufholsakkaden helfen bei der Blickverfolgung dabei, die Akteure im Blick zu behalten (de Brouwer, Missal, Barnes & Lefèvre, 2002). Die explorativen Sakkaden folgen meist einer Aufmerksamkeitsverschiebung (Kowler et al., 1995). Die Aufmerksamkeit und damit die explorativen Sakkaden können durch domänenspezifische Prozesse beeinflusst werden (Baluch & Itti, 2011). Aufholsakkaden können ebenfalls durch domänenspezifische Prozesse beeinflusst werden (Barnes, 2008). Es ist unklar, ob dieser Einfluss bei den beiden Sakkadentypen auf ähnliche Mechanismen zurückgeht. Es ist daher sinnvoll, die beiden Sakkadentypen getrennt zu analysieren. Anhand der Sakkaden lassen sich weitere Zustände des Suchprozesses wie die Exploration oder die Blickverfolgung unterscheiden. Die Mechanismen, die diese Zustände beschreiben, können dann getrennt untersucht werden. Damit wird die Analyse zusammengesetzter Maße wie Entdeckungsgenauigkeit (Gao et al., 2009) oder Fixationsgesamtzeit (Klein et al., 2009) vermieden, bei denen sich der Beitrag der Einzelkomponenten des Suchprozesses nicht genau bestimmen läßt.

Blickbewegungen und andere domänenallgemeinen Faktoren können als Störvariablen betrachtet werden. Deren Einbezug in die Datenanalyse dient dann vornehmlich der besseren Identifizierung der domänenspezifischen Mechanismen. So werden diese Faktoren auch in der Literatur zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung betrachtet. Diese Sichtweise scheint aber zu eng gefasst. Wenn die domänenallgemeinen

Faktoren zur Entdeckung der Verfolgung und zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung beitragen, dann stellt deren Erforschung eine interessante Fragestellung dar. Es sollte daher versucht werden, den Suchprozess, der zur Entdeckung der Verfolgung führt, mitsamt den domänenallgemeinen Faktoren zu rekonstruieren.

1.9 Zwei empirische Studien

In den nächsten zwei Kapiteln werden zwei Studien vorgestellt, die sich mit der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung beschäftigen. Die erste Studie verwendet Musteranalysen und Eyetracking, um den Suchprozess der zur Entdeckung der Verfolgung führt, mitsamt den domänenallgemeinen Faktoren zu rekonstruieren. Diese Kombination von Musteranalysen und Eyetracking soll dabei helfen, die Probleme der früheren Forschung zu vermeiden. Mit der Behebung dieser Probleme kann auch die Frage nach der Domänenspezifität der Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung beleuchtet werden.

Es ist möglich, dass sich die Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung im Laufe der Entwicklung insbesondere in Hinsicht auf die Frage der Domänenspezifität ändern. Die zweite Studie untersucht die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei Säuglingen und vergleicht deren Leistung in einer Verfolgungsentdeckungsaufgabe mit der Leistung von Erwachsenen. Wie bereits dargelegt, sind Musteranalysen schwerlich in der Säuglingsforschung einsetzbar. In der zweiten Studie wird daher das übliche hypothesengeleitete Vorgehen beibehalten. Auch in dieser zweiten Studie wird das Blickverhalten untersucht. Die zustandsbasierte Auswertung wird auch in der zweiten Studie einen wichtigen Beitrag zur Behebung der Probleme der früheren Generationen leisten.

Kapitel 2

Musteranalysen der Verfolgungsentdeckung mit Eyetracking

2.1 Einleitung

In dem ersten Kapitel wurden zwei Probleme der früheren Forschungsgenerationen festgestellt:

- Die Ergebnisse können durch Versuchsleiters Wahl der Fragestellung, der Hypothesen und der Stimuli verzerrt werden.
- Die Grundeigenschaften der Stimuli können nicht experimentell kontrolliert werden und damit sind die Aussagen zu domänenspezifischen Mechanismen der Verfolgungsentdeckung schwer zu belegen.

Es wurden zwei Lösungsansätze vorgestellt, die helfen sollen den Problemen der früheren Forschungsgenerationen zu begegnen:

- Musteranalysen
- Das Einbeziehen domänenallgemeiner Faktoren in die Auswertung mit Hilfe von Eyetracking erlaubt es diese Faktoren in der Auswertung zu kontrollieren.

Diese beiden Ansätze lassen sich gut kombinieren. Die Blickmessungen lassen sich während einer Entdeckungsaufgabe problemlos durchführen. Zudem lassen sich die

Musteranalysen nicht nur dazu verwenden, die Bewegungsmuster kurz vor dem Tastendruck (d.i. Entdeckung) auszuwerten, sondern zusätzlich zur Analyse der Sakkadenziele (wie in Kienzle et al., 2009). Mit Hilfe von Eyetrackingdaten können die angeschauten Akteure bestimmt werden. Ebenso lassen sich Distraktoren präsentieren. Diese bieten für die Versuchsperson mehr Freiraum bei der Wahl der relevanten Bewegungsaspekte. Das senkt die Gefahr der Verzerrung der Musteranalysen durch vom Versuchsleiter gewählte Verfolgungsmerkmale. Es macht zusätzlich die Entdeckungsaufgabe besser vergleichbar mit den Entdeckungsaufgaben der dritten Forschungsgeneration.

Das gewählte Vorgehen verspricht damit, die Probleme der früheren Forschungsgenerationen adäquat anzugehen und damit einen wichtigen Beitrag zur Erforschung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung zu leisten.

2.2 Methoden

2.2.1 Stichprobe

Für die Musteranalysen ist es vorteilhaft, eine möglichst hohe Anzahl von Trials pro Versuchsperson zu erheben. Es wurden daher nur vier Versuchspersonen (eine männlich) erhoben. Die Studie beinhaltete sechs ein- bis anderthalb stündige Sitzungen pro Versuchsperson. Jede Sitzung wurde mit 10 Euro vergütet. Das Alter der Versuchspersonen lag zwischen 23 und 28 Jahren.

2.2.2 Stimuli

Den Versuchspersonen wurden 14 weiße Ringe vor einem grauem Bildschirmhintergrund gezeigt. Der Ringdurchmesser betrug ein Grad des Seh winkels. Die Ringe bewegten sich mit einer Geschwindigkeit von 14,5 Grad pro Sekunde. Ein Ring änderte die Bewegungsrichtung durchschnittlich einmal in 185 Millisekunden. Der „Jäger“ bewegte sich nach einer Richtungsänderung auf die „Beute“ zu. Die neue Richtung der Beute und der restlichen Ringe wurde zufällig aus dem Bereich zwischen 60 Grad links bis 60 Grad rechts von der alten Bewegungsrichtung gewählt. Die Ringe bewegten sich auf dem Bildschirm innerhalb einer rechteckigen Fläche (26×26 Grad). Wenn ein Ring die Grenze der rechteckigen Fläche erreichte wurde die Bewegungsrichtung durch die Wand wie ein Lichtstrahl gespiegelt. Die Bewegung des Jägers wurde nicht gespiegelt, sondern richtete sich, wie bei einem üblichen Bewegungswechsel, auf die Beute hin.

Die Ringe waren durchlässig, d.h., es gab keine Kollisionen zwischen den Ringen. Die Ringe starteten auf einer zufälligen Position, so dass der Abstand zwischen der Beute und dem Jäger mindestens 12 Grad und höchstens 18 Grad betrug. Ein Trial dauerte 30 Sekunden. Der Mindestabstand zwischen der Beute und dem Jäger wurde mit dem Algorithmus aus Gao et al. (2009) auf 3 Grad eingeschränkt. Nach dem der Jäger die Beute eingeholt hatte, behielten die zwei Akteure den durchschnittlichen Abstand von ca. 3,5 Grad bei. Entsprechend könnten die Versuchspersonen den durchschnittlichen Abstand von 3,5 Grad als Erkennungsmerkmal verwenden. Aus diesem Grund wurde in jedem zehnten Trial eine Bewegung gezeigt, in der der Abstand nicht eingeschränkt war. Diese zwei Arten von Trials werden als Trials mit Einschränkung (ME) und Trials ohne Einschränkung (OE) bezeichnet.

2.2.3 Durchführung

Jede der insgesamt 6 Sitzungen bestand aus 3 bis 4 Blöcken mit kurzen Pausen zwischen den Blöcken. Ein Block bestand aus 40 Trials. Davon waren vier Trials ohne Einschränkung des Abstands zwischen Jäger und Beute (OE Trials). Jede Versuchsperson sah die gleichen Trials. Die Trialreihenfolge wurde allerdings innerhalb des Blockes randomisiert. Die Versuchspersonen lasen am Anfang der ersten Sitzung eine schriftliche Instruktion. Um sicherzustellen, dass die Versuchspersonen die Aufgabe verstanden haben, wurde am Anfang der ersten Sitzung ein zusätzlicher Block mit zehn Übungstrials durchgeführt. Die Blickbewegungen wurden mit einem Eyelink II Eyetracker mit 500 Hz aufgenommen. Die Versuchspersonen saßen im Abstand von 50 cm vor dem Bildschirm der mit 85 Hz das Experiment anzeigte. Der Eyetracker wurde vor und nach jedem Block an- und abgesetzt. Vor jedem Block wurde der Eyetracker neu kalibriert. Zu Beginn eines Trials wurden die Versuchspersonen instruiert auf ein Kreuz in der Mitte des Bildschirms zu schauen. Der Blick wurde um den Unterschied zwischen der Fixationsposition und der Bildschirmmitte verschoben, so dass der Blick in der Bildschirmmitte lag. Falls die Abweichung bei der Korrektur größer als 3 Grad war, wurde eine neue Kalibrierung durchgeführt. Nach der Kalibrierung wurde die Bewegung der Ringe gezeigt. Die Bewegung wurde angezeigt bis die Versuchsperson die Maustaste drückte, oder bis 30 Sekunden abgelaufen waren. Bei erfolgtem Tastendruck blieben die Ringe auf der letzten Position stehen und die Versuchsperson wurde aufgefordert die Beute und den Jäger mit der Maus anzuzeigen. Darauf folgte der nächste Trial. Jeweils nach 10, 20, 30 und 40 Trials. bekam die

Versuchsperson eine Rückmeldung über ihre Erfolgsrate in den letzten zehn Trials. Die Rückmeldung wurde auf dem Bildschirm angezeigt. Das Experiment wurde mit PsychoPy gesteuert (Peirce, 2007).

Grundzustand	v	a	d
Fixation	[0, 6]	< 800	> 80
LGA	[4, 21]	< 800	> 80
SGA	[9, 21]	< 800	> 100
Sakkade	> 21	> 4000	> 20

Tabelle 2.1: Schwellenwerte zur Bestimmung der Grundzustände. Die Werte geben das Minimum und/oder das Maximum an. v - Geschwindigkeit in Grad /s. a - Beschleunigung in Grad/s². d - Zustandsdauer in Ms.

2.2.4 Verarbeitung der Blickdaten

Die Blickpositionsdaten wurden jeweils für das linke und das rechte Auge sowie für die horizontale und die vertikale Koordinatenachse getrennt mit einem Gauß-Filter geglättet. Die Standardabweichung des Gauß-Filters betrug 20 ms. Abschnitte mit fehlenden Daten (d.h. wenn die Pupille vom Eyetracker nicht erkannt wurde) kürzer als 100 Millisekunden wurden linear interpoliert. Waren die Koordinaten beider Augen verfügbar, wurde die Blickposition durch Mittelung berechnet. Falls die Entfernung zwischen der Blickposition beider Augen größer als 4 Grad war, wurde die Blickposition als fehlend gewertet. Nach Glättung und Mittelung wurde die Blickposition auf 85 Herz (entsprechend der Flimmerrate des Bildschirms) interpoliert. Daraufhin wurde die Blickgeschwindigkeit und die Blickbeschleunigung berechnet und anhand dieser vier exklusive *Grundzustände* bestimmt: *Fixationen*, *Sakkaden*, *langsame glatte Augenbewegungen* (LGA) und *schnelle glatte Augenbewegungen* (SGA). Die Unterscheidung und Bestimmung der Fixationen, Sakkaden und der glatten Augenbewegung ist eine üblicher Teil der Eyetrackinganalyse (Barnes, 2008; Salvucci & Goldberg, 2000). Zur Bestimmung der Grundzustände wurden die Schwellenwerte in Tabelle 2.1 verwendet. Wenn die Blickdaten die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsschwellenwerte für die in der dritten Spalte gelistete Mindestdauer erfüllten, wurde der entsprechende Zustand bestimmt. Für SGA kamen zusätzliche Bestimmungskriterien zum tragen. Hier musste mindestens ein Akteur mit folgenden Eigenschaften gegeben sein: Während der ersten 100 Millisekunden der Zustandsdauer sollte die durchschnittliche Entfernung zwischen dem Blickpunkt und dem Akteur weniger als ein Grad betragen. Während

der ganzen Dauer des Zustands musste diese Entfernung weniger als 4 Grad betragen. Schließlich musste die absolute Winkeldifferenz zwischen der Bewegungsrichtung des Blicks und der des Akteurs weniger als 25 Grad betragen. Diese Zusatzkriterien sind an die Literatur angelehnt. Die Blickposition sowie die Blickgeschwindigkeit während der glatten Augenbewegung ist ähnlich zu der Position und der Geschwindigkeit des verfolgten Akteurs. Die Blickgeschwindigkeit ist allerdings nicht identisch sondern der Blick ist üblicherweise bis zu 10% langsamer als das Verfolgungsziel (Barnes, 2008). Die Geschwindigkeit weist periodische Schwankungen auf (Robinson, 1965). Wegen dieser Abweichungen wurde bei der Wahl der oberen und der unteren Schwellenwerte ein Puffer von ca. 6 Grad/Sek gewählt. Die glatten Augenbewegungen werden durch Aufholsakkaden ergänzt. Die Bewegungsmerkmale des Auges und des Akteurs stimmen am besten unmittelbar nach der Aufholsakkade überein. Dieser Aspekt wurde berücksichtigt indem für die SGA auf die hohe Genauigkeit während der ersten 100 Ms geachtet wurde.

Nicht bei jedem Auftreten von glatten Augenbewegung während der Verfolgung von Akteuren wird der Blick stark an einen Akteur gekoppelt. Zum einen verläuft der Anfang sowie das Ende der glatten Augenbewegung allmählich und damit langsamer als die Bewegung des Akteurs. Zum anderen ist es eine populäre Verfolgungsstrategie bei Verfolgung mehrerer Akteure, den Mittelpunkt der Akteurengruppe zu verfolgen (Fehd & Seiffert, 2010). Solche Fälle werden mit den Kriterien für die SGA Bestimmung nicht richtig erkannt. Es wurden daher zusätzlich LGA Zustände eingeführt. Als LGA wurden Abschnitte eingestuft die sich nicht als SGA qualifizierten, jedoch die Kriterien für LGA in Tabelle 2.1 erfüllen.

Zusätzlich wurden bei Fixationen, LGA und SGA auch die Akteure bestimmt, die verfolgt wurden. Im Falle von SGA ergaben sich diese Akteure durch die oben beschriebene Prozedur. Bei Fixationen und LGA waren dies Akteure deren durchschnittliche Entfernung zum Blickpunkt weniger als 4 Grad betrug.

In einem weiteren Schritt wurden Abschnitte bestimmt, in denen die Versuchsperson dieselbe Akteurengruppe über mehrere Sakkaden verfolgte. Diese Abschnitte werden im Folgenden *Blickverfolgung* genannt. Die Abschnitte, die nicht als Blickverfolgung eingestuft werden, werden *Exploration* genannt. Eine Blickverfolgung kann alle vier Grundzustände beinhalten. Die Exploration schließt SGAs aus. Zusätzlich müssen die Gruppen verfolgter Akteure zwischen den nachfolgenden Grundzuständen überlappen, und jede Verfolgung muss mindestens eine SGA beinhalten. Die Sakkaden zwischen zwei Grundzuständen, die beide zur Blickverfolgung gehören werden als

Aufholsakkaden eingestuft. Die restlichen Sakkaden werden als explorative Sakkaden eingestuft. Die Sakkadenziele dieser Sakkadengruppen lassen sich dann über Musteranalysen auswerten.

Wenn sich die verfolgten Akteure um mehr als 4 Grad voneinander entfernen, kommt es bei dem oben beschriebenen Verfahren zur Zustandsbestimmung zu systematischen Fehler bei der Einstufung der Verfolgungsbewegung. Wenn Menschen mehrere bewegende Objekte verfolgen, dann wechseln sie oft zwischen den Akteuren (Fehd & Seiffert, 2010). Wenn diese Akteure mehr als 4 Grad voneinander entfernt sind, dann wird diese Blickverfolgung in mehrere Blickverfolgungs- und Explorationsabschnitte aufgeteilt. Um dies zu vermeiden, wurden die Ergebnisse des automatisierten Verfahrens durch zwei Kodierer mit Hilfe einer per PsychoPy erzeugten Software überprüft. Die Software erlaubt es dem Kodierer, Abschnitte von Exploration und Blickverfolgung zu erzeugen, zu löschen oder anzupassen. Die Software zeigte die Bewegung der Akteure sowie die Grundzustände und die algorithmisch identifizierte Blickverfolgung und Exploration. Die Softwareanzeige wird im Film 1, 2, 11, 13 und 14 gezeigt. Der schwarze Kreis gibt den Blickpunkt wieder. Die weißen Kreise stellen die Akteure dar. Die mit dem Blick verfolgten Akteure werden farbig hervorgehoben. Die Graphen auf der rechten Seite zeigen von oben nach unten die Geschwindigkeit, Beschleunigung und die vier Grundzustände. Im unteren Teil werden die Sakkaden (blau) und die bereits korrigierten Blickverfolgungsabschnitte (rot) gezeigt. Die Kodierer sahen die nicht korrigierten Abschnitte und passten diese an. Links am unteren Rand des Bewegungsraumes wird die Zeit seit dem Trialanfang gezeigt. Die Filme sind leicht verlangsamt. Film 1 illustriert beispielsweise einen Fall, in dem sich die verfolgten Akteure weiter als 4 Grad voneinander entfernen (3-4 Sekunden nach dem Trialanfang). Film 2 zeigt einen typischen Trial mit mehreren Blickverfolgungen hintereinander. Ein Kodierer überprüfte die Daten aller Versuchspersonen. Ein zweiter Kodierer überprüfte die Daten der Versuchsperson 1 und 2. Die Ergebnisse beider Kodierer wurden integriert. Diese Prüfung erlaubte es zusätzlich, Trials mit schlechter Kalibrierung oder einem großen Anteil fehlender Daten zu identifizieren und aus der Analyse auszuschließen.

Blickverfolgung und Exploration bestimmten die Aufteilung der Sakkaden in zwei Gruppen. Aufholsakkaden (AS) sind alle Sakkaden, die zwei Grundzustände trennen, welche beide zur Blickverfolgung gehören. Explorative Sakkaden (ES) sind alle restlichen Sakkaden. Weiterhin wurde die Reihenfolge der Aufholsakkaden innerhalb des jeweiligen Blickverfolgungsabschnittes unterschieden. Diese Sakkaden werden als

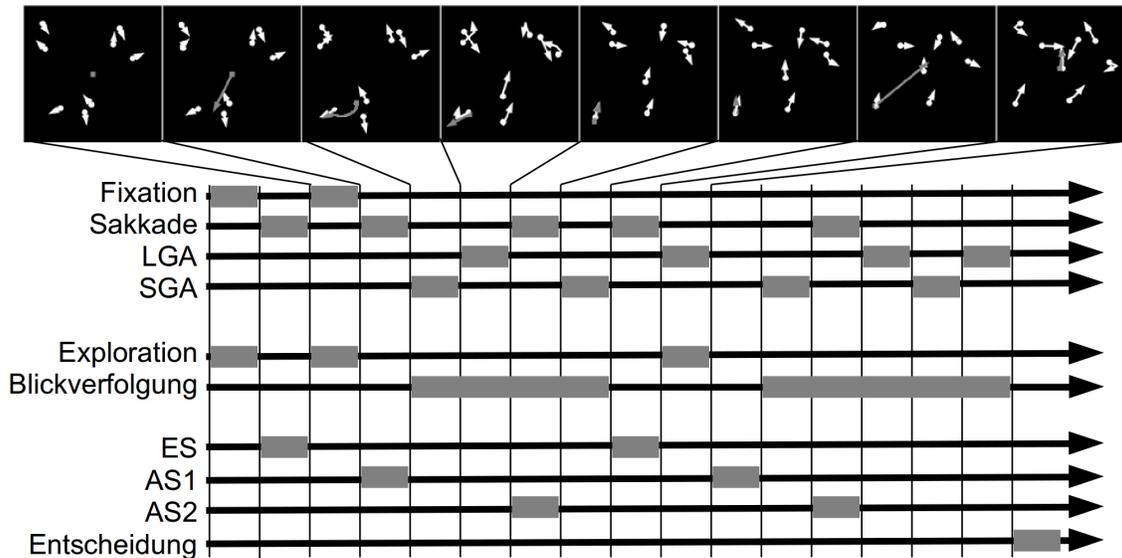


Abbildung 2.1: Die Zellen in dem oberen Teil zeigen die Bewegung der Akteure (weiß) und die Blickbewegung einer Versuchsperson (grau). Die Bewegung wird als ein Pfeil gezeigt. Der Pfeilanzug und das Pfeilende entsprechen jeweils dem Anfang und dem Ende der Bewegung. Das Sequenzdiagramm unterhalb der Zellen zeigt die Grundzustände, die Exploration, die Blickverfolgung, die explorativen Sakkaden, die Aufholsakkaden und deren zeitliche Abfolge. Ein grauer Balken zeigt jeweils ein Ereignis. Die Zeitachse verläuft von links nach rechts. Um die Abbildung zu vereinfachen sind alle Grundzustände in diesem Beispiel gleich lang.

erste Aufholsakkade (AS1), zweite Aufholsakkade (AS2) und so weiter bezeichnet. Das ganze Vorgehen zur Bestimmung der ES und AS wird in Abbildung 2.1 an einem konstruierten Beispiel dargestellt.

Mit den Musteranalysen wurde untersucht, was auf der Zielposition der Sakkade zu dem Zeitpunkt des Sakkadenanfangs passiert. Dazu wurden kurze Filmausschnitte mit konstanter Dauer und mit konstanter Breite/Höhe erzeugt. Der Ausschnitt beginnt 400 Ms vor dem Sakkadenanfang und endet 400 Ms nach dem Sakkadenanfang. Da nur das Geschehen in der Nähe der Sakkade von Interesse ist, wurde ein rechteckiger Ausschnitt erzeugt. Dieser Ausschnitt erstreckte sich von 5 Grad oberhalb bis 5 Grad unterhalb und von 5 Grad links und bis 5 Grad rechts des Sakkadenzieles.

Die Musteranalysen des Entdeckungszeitpunkts folgten einer ähnlichen Logik. Der genaue Entscheidungszeitpunkt ist unklar. Bekannt ist nur, wann die Versuchsperson die Taste gedrückt hatte. Es wurde daher untersucht, was 500, 400, 300, 200, 100 und 50 Ms vor dem Tastendruck an der Stelle auf die die Versuchsperson geschaut hatte passierte. Das räumliche Fenster wurde wieder auf das rechteckige Umfeld von 5 Grad

eingeschränkt. Das Zeitfenster beginnt 800 ms vor dem jeweiligen Entscheidungszeitpunkt und endet mit dem Entscheidungszeitpunkt.

Die Ergebnisse der Musteranalysen sind kleine Filmausschnitte. Diese Filme sind der vorliegenden Schrift per CD beigelegt. Alternativ können diese von der Github Website des Autors heruntergeladen werden:

<http://github.com/simkovic/dissertation/archive/master.zip>.

Die Zeit in dem Film entspricht nicht der Echtzeit. Jeder Film zeigt eine Zeitachse. Die jeweilige Zeitachse wird bei der Ergebnisdarstellung erklärt.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Entscheidungszeitpunkt

Die meisten Trials endeten mit einem Tastendruck. Die Entscheidung über den Tastendruck musste anhand der Evidenz unmittelbar vor dem Tastendruck geschehen sein. Es wird daher untersucht, was 500, 400, 300, 200, 100 und 50 Ms vor dem Tastendruck an der Stelle passierte, auf die die Versuchsperson geschaut hat. Eine Auswertung zum Zeitpunkt des Tastendrucks ist nicht sinnvoll. Die glatten Augenbewegungen können nicht ruckartig beendet werden. Die Versuchspersonen verlangsamten den Blick bereits kurz vor dem Tastendruck. Der Blick landet dann kurz nach dem Tastendruck auf dem Verfolgungsziel. Als Folge stimmt der Blick während des Tastendruckes mit dem Verfolgungsziel nicht überein. Alle Fälle in denen sich der Entscheidungszeitpunkt mit einer Sakkade deckte, wurden ausgeschlossen.

Die Bewegung in den Ausschnitten, welche die Stichprobe für die Musteranalyse bilden, ist gerichtet. Alle Ausschnitte wurden rotiert, so dass die Bewegungsrichtung in allen Ausschnitten in dieselbe Richtung zeigt. Die Ausschnitte wurden so rotiert, dass die Bewegung in jedem Ausschnitt von links nach rechts verläuft. Die Akteure die fokussiert wurden, bewegten sich nicht alle in der gleichen Richtung. Es wurde die dominante Bewegungsrichtung bestimmt. Zuerst wurde ein Histogramm der Bewegungsrichtung aller Akteure aus allen Einzelbildern (bei 85 Hz) gebildet. Die Akteure wurden anhand ihrer Entfernung zu dem Blickpunkt (mit einem Polynomialfenster mit Radius 5 Grad) gewichtet, so dass nur die Akteure in der Blickpunktnähe zur Bestimmung der dominanten Bewegungsrichtung beitragen. Der Modus des Histogramms bestimmt die dominante Bewegungsrichtung.

Die Ausschnitte wurden für jede Versuchsperson gemittelt. Die Durchschnittsmuster

werden in Film 3 gezeigt. Jede Zeile zeigt jeweils eine Versuchsperson. Die Spalten zeigen unterschiedliche Entscheidungszeitpunkte. Die Zeitachse erstreckt sich von 800 Ms vor dem Entscheidungszeitpunkt bis zu dem Entscheidungszeitpunkt. Bei Versuchspersonen 2, 3 und 4 zeigen die Durchschnittsmuster zwei Akteure die sich nacheinander in der dominanten Richtung bewegen. Versuchsperson 1 fokussiert einen Akteur mit zusätzlichen Akteuren davor und dahinten. Ein Vergleich zwischen den Spalten zeigt, dass die Muster besser erkennbar sind, wenn der Entscheidungszeitpunkt 100 oder 200 Ms vor den Tastendruck gesetzt wird. So einfach die Mittelungsproze-

	HK1	HK2	HK3	HK4	HK5
Entscheidung	[6, 8; 8, 0]	[3, 3; 3, 8]	[2, 4; 2, 8]	[1, 9; 2, 1]	[1, 8; 2, 0]
Explorative Sakkade	[3, 7; 4, 6]	[2, 3; 2, 4]	[1, 9; 2, 0]	[1, 5; 1, 6]	[1, 4; 1, 5]
Aufholsakkade 1	[6, 0; 7, 6]	[2, 5; 2, 9]	[2, 0; 2, 1]	[1, 7; 1, 9]	[1, 5; 1, 8]
Aufholsakkade 2	[6, 7; 8, 1]	[2, 7; 3, 0]	[2, 0; 2, 3]	[1, 9; 2, 1]	[1, 6; 1, 7]
Stimulus	16, 8	3, 4	2, 1	1, 8	1, 7

Tabelle 2.2: Anteil der erklärten Varianz bei den ersten fünf Hauptkomponenten mit dem höchsten Varianzanteil. Das Interval in jeder Zelle zeigt den minimalen sowie den maximalen Wert über die vier Versuchspersonen hinweg.

dur scheinen mag, ist sie doch gefahrenbehaftet: Angenommen die Versuchsperson verfolgt einen Akteur. Wenn die Versuchsperson in der Hälfte der Ausschnitte den Blick vor den Akteur setzt und in der anderen Hälfte hinter den Akteur, dann ergibt die Mittelung ein Muster mit zwei Akteuren. Es ist möglich, dass die Mittelung ein Durchschnittsmuster erzeugt, welches keinen der Ausschnitte beschreibt. Um solche Fehler zu vermeiden, wurden die Ausschnitte mit einer Hauptkomponentenanalyse ausgewertet. Diese Auswertung beschränkte sich auf die Ausschnitte mit Entscheidungszeitpunkt 200 ms vor dem Tastendruck. Betrachtet wurden die zehn Hauptkomponenten, die den höchsten Varianzanteil erklären. Die erste Reihe in Tabelle 2.2 zeigt den Anteil der Varianz die durch die ersten fünf Hauptkomponenten (HK) erklärt wurde. Film 4 zeigt die zehn Hauptkomponenten (Spalten) für jede von den vier Versuchspersonen (Reihe). Die erste Hauptkomponente ist ähnlich zu dem Durchschnittsmuster und sie erklärt 6,8 bis 8,0 Prozent der Varianz. Mit Hilfe der zweiten und der dritten Komponente kann die erste Komponente senkrecht und/oder waagrecht verschoben werden. Film 5 illustriert dieses Vorgehen. Die erste und die zweite Zelle in Reihe A zeigen jeweils HK1 und HK2 der Versuchsperson 2. Die dritte Zelle zeigt das Ergebnis, wenn HK2 von HK1 subtrahiert wird. Eine feinere Verschiebung kann erzeugt werden indem noch zusätzlich die dreipoligen Hauptkomponenten (wie etwa HK5 der

Versuchsperson 2) addiert werden.

Als nächstes wurden die Hauptkomponenten zwischen den Versuchspersonen verglichen. Die Hauptkomponenten sind formal Eigenvektoren. Eigenvektoren die sich nur bezüglich eines multiplikativen Faktors unterscheiden sind identisch. Insbesondere ist die Umpolung einiger Hauptkomponenten in Film 4 (vergleiche HK2 der Versuchsperson 2 mit HK2 der Versuchsperson 3) inhaltlich nicht bedeutsam - diese Hauptkomponenten zeigen ähnliche Eigenvektoren. Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse bestätigten die Analyse der Durchschnittsmuster. Bei Versuchsperson 1 ist die Interpretation der Komponenten etwas komplexer. HK1 ist zwar ähnlich zu dem Durchschnittsmuster aber mit Hilfe von HK2 lassen sich Muster erstellen, die ähnlich zur HK1 der Versuchspersonen 2, 3 und 4 sind. Film 5 zeigt in Reihe B, wie durch Addition von HK1 (erste Zelle) und HK2 (zweite Zelle) der Versuchsperson 1 ein Muster mit zwei Akteuren zu erhalten ist. Hier fokussierte die Versuchsperson die Beute. Werden HK1 und HK2 voneinander subtrahiert, resultiert ebenfalls ein Muster mit zwei Akteuren. In diesem Fall stand allerdings der Jäger im Blickpunkt. Die Hauptkomponentenanalyse deutet darauf hin, dass Versuchsperson 1 abwechselnd die einzelnen Akteure fokussierte. Die Versuchspersonen 2, 3 und 4 betrachteten dagegen die zwei Akteure als eine Gruppe.

In einem weiteren Schritt wurden die Verfolgungsmuster bei HK1 der Versuchsperso-

VP	p_1	v_1	s_1	p_2	v_2	s_2	$p_1 - p_2$
2	2,64	-13,37	0,16	-1,02	-13,47	0,16	3,66
3	2,19	-13,21	0,16	-1,33	-13,02	0,17	3,52
4	2,11	-13,74	0,16	-1,69	-13,06	0,15	3,8

Tabelle 2.3: Parameter für die grauen diagonalen Linien in Abbildung 2.2. p - Position in Grad bei $t = -0,2$ Ms. v - Neigung in Grad pro Sekunde. s - die Breite des Maximums (orthogonal zu v). VP - Versuchsperson.

nen 2, 3 und 4 quantifiziert. Insbesondere war die Entfernung der zwei Akteure vom Interesse. Um diese zu berechnen, wurde die zur dominanten Ausrichtung orthogonale Dimension weggelassen. Es wurden die zwei zentralsten waagerechten Pixelreihen (0,3 Grad Breite) in den Zellen in Film 4 gemittelt und in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Abbildung 2.2 zeigt die Ergebnisse. Die Verfolgungsbewegung der Akteure erscheint als zwei parallele Linien, die Zugschienen ähneln. Diese Darstellung der Muster wird daher nachfolgend als *Schienendiagramm* bezeichnet. Es wurden die Maxima in den Schienendiagrammen analysiert. Dazu wurden Linien an die Maxima angepasst und es wurde die Absetzung und Neigung dieser Linien geschätzt. Der

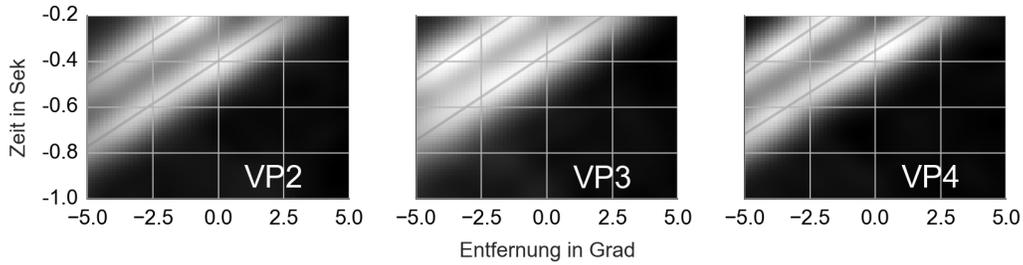


Abbildung 2.2: Jede Zelle zeigt ein Schienendiagramm der HK1. Die Zellen zeigen jeweils die Daten für die Versuchspersonen 2, 3 und 4. Die senkrechte Achse zeigt die Zeit bis zum Tastendruck. Die waagerechte Achse zeigt die Entfernung vom Blickpunkt. Die weißen Streifen in der Abbildung zeigen die Bewegung der Akteure. Die Neigung der Streifen kann als Geschwindigkeit der Akteure interpretiert werden. Um die Geschwindigkeit zu schätzen, werden Linien an die Pixel in der Abbildung gepasst. Die Ergebnisse dieser Passung werden als graue diagonalen Linien gezeigt.

kürzeste Abstand zwischen Punkt (x, t) und einer Linie mit Absetzung p und Neigung v ist $h(x, t) = (p + vt - x)/(1 + v^2)$. Mit Hilfe des Simplex Algorithmus (Nelder & Mead, 1965) wurde die Korrelation zwischen den Pixeln des Schienendiagramms und einer Summe aus zwei unimodalen Funktionen maximiert. Der Wert der unimodalen Funktion für Abstand x und Zeit t ist gegeben durch $\max(0, 1 - [h(x, t)/s]^3)$. s ist ein zusätzlicher Parameter der die Breite der Funktion bestimmt. Diese Funktion wurde für diese Analyse entworfen und passt gut zu der Form der Maxima in den Schienendiagrammen. Die Pixelwerte in den Schienendiagrammen wurden vor der Passung auf das Intervall $[0, 1]$ normiert.

Die grauen diagonalen Linien in Abbildung 2.2 zeigen die Ergebnisse der Linienschätzung. Tabelle 2.3 listet die Werte der Parameter mit der besten Passung. Die Akteure bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 13 bis 14 Grad. Dies ist etwas weniger als die tatsächliche Geschwindigkeit mit der sich die Ringe bewegen (14,5) vermutlich weil sich die Ringe nicht perfekt in Richtung der dominanten Ausrichtung bewegen. Die zu dieser Richtung orthogonale Bewegung geht damit verloren. 200 Ms vor dem Tastendruck ist die Beute 2,1 bis 2,7 Grad vor dem Blickpunkt. Der Jäger befindet sich 1 bis 1,7 Grad hinter dem Blickpunkt. Die Entfernung zwischen den Akteuren beträgt 3,5 bis 3,8 Grad.

VP	ES	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6+	E	% AS1/ES	% E/AS1
1	11537	4251	2400	1685	1273	996	3593	784	36,8	18,4
2	9269	4102	2663	1731	1209	854	1929	827	44,3	20,2
3	12829	4841	3181	2192	1613	1197	3873	893	37,7	18,4
4	8232	2867	1812	1054	636	390	566	883	34,8	30,8

Tabelle 2.4: Anzahl der Sakkaden für jede Versuchsperson (VP). ES - Explorative Sakkade, AS - Aufholsakkade, E - Versuchsperson hat Taste gedrückt und den Trial beendet

2.3.2 Musteranalysen der Sakkadenziele

Tabelle 2.4 zeigt die Anzahl der Sakkaden für jede Versuchsperson und für jeden Sakkadentyp. In diesem Teil werden nur die Ergebnisse der Musteranalysen für ES und AS1 präsentiert. Die Ergebnisse für AS2 sind ähnlich zu AS1, und bei den späteren Aufholsakkaden (AS3+) sind die Muster wegen niedriger Sakkadenanzahl uneindeutig und verrauscht. Wie bereits erläutert, wird bei jeder Sakkade ein Filmausschnitt von 5 Grad um das Sakkadenziel herum erzeugt. Dieser Ausschnitt beginnt 400 Ms vor dem Sakkadenanfang und endet 400 Ms nach dem Sakkadenanfang. Wie bei der Analyse der Entscheidungsmuster wurden die Ausschnitte rotiert damit ihre dominante Ausrichtung übereinstimmt.

Als erstes sollen die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der ES betrachtet werden. Film 6 zeigt für jede Versuchsperson die ersten zehn Hauptkomponenten mit dem höchsten Anteil an erklärter Varianz. Die zweite Reihe in Tabelle 2.2 zeigt den Varianzanteil der durch die ersten fünf Komponenten erklärt wird. Der Vergleich der Hauptkomponenten über die vier Versuchspersonen zeigt nur kleine Unterschiede. Die erste Komponente zeigt einen Akteur mit einer breiten ihn umgebenden Wolke. Wie bei den Analysen der Entscheidungszeitpunkte beschreibt die zweite und die dritte Komponente eine horizontale oder eine vertikale Verschiebung um ungefähr einen Grad. Die mehrpoligen HKs, die zur feineren Verschiebung dienen, sind auch sichtbar (z. Bsp. HK4 und HK6 bei Versuchsperson 1). Die HK4 und HK6 unterscheiden sich zwischen den Versuchspersonen. Allerdings läßt sich HK4 und HK6 der Versuchsperson 1 zum Beispiel auch durch addieren und subtrahieren von HK4 und HK6 der Versuchsperson 2, 3 oder 4 erzeugen. Die HK4 erklärt 1,5-1,6% der Varianz, während HK6 1,4% erklärt. Die Unterschiede zwischen der Versuchsperson 1 und den Versuchspersonen 2, 3 und 4 bezüglich HK4 und HK6 gehen damit auf weniger als 0,2% (1,6-1,4) der Varianz zurück und haben kaum inhaltliche Bedeutung.

Da die HK4 zwei Akteure zeigt, kann sie auch zur Entdeckung der Verfolgung dienen. Dafür spricht auch die Tatsache, dass bei den zweipoligen Verschiebungskomponenten (HK2 und HK3) die senkrechte Komponente mehr Varianz erklärt. Bei den dreipoligen Verschiebungskomponenten erklärt dagegen die waagerechte Komponente um 0,2% mehr Varianz. Das Verfolgungsmuster erklärt damit mindestens 0,2% der Varianz. Wiederum handelt es sich um einen geringen Varianzanteil, der möglicherweise auch durch zufälliges Erscheinen der Beute und des Jägers an der Stelle des Sakkadenzieles zustande kommen kann. Die domänenspezifischen Aspekte der Verfolgungsbewegung werden also bei der Zielwahl der explorativen Sakkaden nicht beachtet. Die restlichen Hauptkomponenten beschreiben Richtungsänderungen.

Die ersten Aufholsakkaden (AS1) wurden ähnlich wie die explorativen Sakkaden (ES) analysiert. Die Hauptkomponenten werden in Film 7 gezeigt und sind mit wenigen Ausnahmen identisch zu den ES Hauptkomponenten in Film 6. Bei näherer Betrachtung wird ersichtlich, dass das Maximum bei AS1 erst 50 Ms nach dem Sakkadenanfang die Ausschnittsmitte erreicht. Bei ES wird die Mitte zu dem Sakkadenanfang erreicht. Wahrscheinlich ist bei AS1 ein Prädiktionsmechanismus wirksam, so dass die Aufholsakkaden nicht dorthin zielen wo sich der Akteur gerade befindet, sondern dorthin, wo sich dieser nach dem Beenden der Sakkade (ca. 50 ms später) befindet. Die dritte Reihe in Tabelle 2.2 zeigt, dass die ersten fünf Hauptkomponenten (vor allem aber die HK1) mehr Varianz bei AS1 als bei ES erklären. Das deutet auf eine höhere Genauigkeit der Aufholsakkaden hin. Die Hauptkomponenten (nicht gezeigt) sowie der erklärte Varianzanteil (vierte Reihe in Tabelle 2.2) bei AS2 sind ähnlich zu AS1.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse zeigen, dass die explorativen Sakkaden sowie die Aufholsakkaden auf die Gebiete mit hoher Akteurendichte gerichtet werden. Domänenspezifische Verfolgungsmuster findet man unter den Hauptkomponenten nicht.

2.3.3 Welche Bewegungsmuster lösen Blickverfolgung aus?

Im vorigen Teil wurden bereits einige Vergleiche zwischen den Mustern für die Sakkadenziele von ES und AS1 vorgenommen. In diesem Absatz wird dieser Vergleich direkter gemacht. Es werden die Klassifizierungsbilder zwischen ES und AS1 berechnet. Diese beschreiben die Unterschiede zwischen den zwei Sakkadenarten. Dieser Vergleich sollte klären welche Bewegungsmuster die Blickverfolgung auslösen. Ähnlich wie bei Kienzle

et al. (2009) wurde das Verfahren der Support Vector Machine (SVM) verwendet um ES und AS1 zu klassifizieren. Wie in Kienzle et al. (2009) werden danach die Maxima und Minima der Entscheidungsfunktion der SVM berechnet, damit die SVM Lösung interpretiert werden kann.

SVM ist eine nichtlineare Klassifizierungsmethode welche eine paarweise Ähnlichkeitsmetrik S benötigt. Als Ähnlichkeitsmetrik wird die euklidische Entfernung zwischen den Pixelwerten zweier Ausschnitte verwendet. Es wurden dieselben Ausschnitte wie bei der Mittelung und bei der Hauptkomponentenanalyse verwendet. Mit der Ähnlichkeitsmetrik wurden ES und AS1 Ausschnitte paarweise untereinander sowie gegenseitig verglichen. Für zwei Ausschnitte x_m und x_n ist die Ähnlichkeit durch die Euklidische Entfernung dieser Vektoren gegeben: $S(x_m, x_n) = \sum_f \sum_i \sum_j (x_m(f, i, j) - x_n(f, i, j))^2$. $x(f, i, j)$ ist der Wert des i -ten Pixels von links und j -ten von oben, im f -ten Bild in der Bildfolge. Die Entscheidungsfunktion der SVM ist gegeben durch $F(w, b) = \sum_m [1 - y_m(\sum_n w_n \cdot K(x_m, x_n) + b)]_+ + \frac{\gamma}{2}|w|^2$. Die Funktion $[\cdot]_+$ ist $[x]_+ = x$ für $x > 0$ und $[x]_+ = 0$ für $x < 0$. $K(a, b)$ ist die Gauß-Funktion $K(a, b) = \exp\left(\frac{S(a, b)}{\beta}\right)$. Die Variablen β und γ sind die freien Parameter. $1/\beta$ entspricht der Varianz der Gaußverteilung. β bestimmt, wie viel Wert auf eine hohe Ähnlichkeit gelegt wird. Bei großem β ist $K(a, b) = 1$ und die Ähnlichkeitsunterschiede werden bei der Klassifizierung nicht berücksichtigt. Mit kleinerem β spielen die Ähnlichkeitsunterschiede eine größere Rolle. γ bestimmt die Komplexität der Klassifizierungsmethode. Ein kleines γ steht für viele Stützvektoren und für ein komplexes Modell. Durch eine erschöpfende Gittersuche werden die β und γ mit bester Klassifizierungsrate ermittelt. Die Klassifizierungsrate wird mit Hilfe des Kreuzvalidierungsverfahrens berechnet. Die Entscheidungsfunktion, die Gittersuche bei β und γ und die Kreuzvalidierung werden standardmäßig bei SVM Analysen verwendet (Bishop et al., 2006, Kapitel 7). Die Wahl der Gausschen Funktion für K ist auch üblich. Der euklidische Abstand wurde als Ähnlichkeitsmetrik von Kienzle et al. (2009) verwendet und ist bei visuellen Stimuli sinnvoll. Zur Berechnung wurde die Software Libsvm herangezogen: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.

Tabelle 2.5 zeigt die Klassifizierungsleistung, die Anzahl der Ausschnitte und die Anzahl der Stützvektoren. Die Klassifizierungsleistung der SVM liegt nur 1-1.5% über der Zufallsleistung. Die hohe Anzahl der Stützvektoren deutet auf eine komplexe Lösung des Klassifizierungsproblems hin. Die Klassifizierung zeigt insgesamt wenig Erfolg. Die Ausschnitte der zwei Sakkadengruppen sind sehr ähnlich und können

VP	KL	ZL	#ES	#AS1	#SV	%SV	$\log(\gamma)$	$\log(\beta)$
1	75,98	75,03	10760	3580	12863	89,70	1,0	0,0
2	71,29	69,88	8272	3566	11640	98,33	0,5	1,0
3	74,44	73,52	11859	4271	15977	99,05	0,5	1,5
4	76,85	75,51	7606	2467	8876	88,12	0,5	0,5

Tabelle 2.5: Ergebnisse der SVM Klassifizierung. VP - Versuchsperson, KL - Klassifizierungsleistung der SVM, ZL - Zufallsleistung: $ZL = \#ES / (\#ES + \#AS1)$, #ES - Anzahl der ES Ausschnitte, #AS1 - Anzahl der AS1 Ausschnitte, #SV - Anzahl der Stützvektoren, %SV - Anteil der Stützvektoren an der Gesamtzahl der Ausschnitte ($\%SV = \#SV / (\#ES + \#AS1)$)

nicht verlässlich klassifiziert werden.

Um herauszufinden welche Bewegungsmerkmale zwischen ES und AS1 unterscheiden, wurde in einem weiteren Schritt die von der SVM gefundene Klassifizierungslösung näher untersucht. Wie in Kienzle et al. (2009) wurde die Funktion F bezüglich der Variable x maximiert/minimiert. Die Parameter w und b (sowie γ und β) wurden diesmal konstant gehalten. Die Maxima und Minima der Funktion helfen dabei, die von der SVM gefundene Lösung zu interpretieren. Die Ausschnitte x sind $64 \times 64 \times 68 = 278528$ Pixel groß. Um das Optimierungsproblem zu vereinfachen wurde x zur $32 \times 32 \times 34$ Auflösung reduziert. Zusätzlich wurden die Pixel als binär mit den Ausprägungen hell oder dunkel betrachtet. Es wurde folgender Algorithmus verwendet um $F(x)$ zu maximieren. Zuerst werden tausend Ausschnitte erzeugt. Genau 10% der Pixel in jedem Ausschnitt sind hell. Die hellen Pixel werden zufällig positioniert. $F(x)$ wird für jeden der tausend Ausschnitte berechnet. Der Ausschnitt mit dem höchstem F -Wert wird im nächsten Schritt beibehalten. Es werden alle Pixel nacheinander umgepolt (dunkel wird hell und hell wird dunkel). Falls die jeweilige Pixeländerung zu einem höheren F -Wert führt, wird diese Änderung beibehalten, sonst wird die Änderung verworfen. Die Reihenfolge bei dem Pixeldurchlauf ist zufällig. Der Pixeldurchlauf wird solange wiederholt bis der Durchlauf zu keiner F -Wertverbesserung führt. Dieser Algorithmus ist ein Bergsteigeralgorithmus. Der Algorithmus konvergiert zwar, aber es findet nicht unbedingt das globale F -Wert Maximum. Um zu überprüfen ob es mehrere Maxima gibt, wird der Suchalgorithmus vier mal wiederholt. Bei der ersten Wiederholung wird ein dunkler Ausschnitt (nur dunkle Pixel) als den Startpunkt für den Bergsteigeralgorithmus verwendet. Diese Prozedur wird auch für die Suche der Minima verwendet: Es wird $-F(x)$ anstatt $F(x)$ maximiert. Die Ergebnisse der Berechnung sind 4 Maxima und 4 Minima für jede der vier Versuchspersonen. Bei

den Maxima und Minima handelt es sich um $32 \times 32 \times 34$ Ausschnitte mit hellen und schwarzen Pixeln. Die Ausschnitte werden wie üblich als kurze Filme dargestellt.

Bei allen hier berichteten Ergebnissen benötigte der Bergsteigeralgorithmus weniger als acht Pixeldurchläufe um zu konvergieren. Die vier Wiederholungen ergaben weitgehend identische Ergebnisse. Die Zeilen in Film 8 zeigen die Minima und Maxima jeweils für eine Versuchsperson. Die Spalten zeigen die Wiederholungen. Die Hintergrundfarbe bei den Maxima ist schwarz. Die Maxima zeigen Bewegung einer Pixelwolke. Die Minima zeigen nur Rauschen. Wahrscheinlich besitzt die Entscheidungsfunktion nur ein Optimum. Dieses Optimum ist das Maximum in Film 8.

Die SVM Analyse bestätigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse. Die schlechte Klassifizierungsleistung deutet auf keine nennenswerten Unterschiede zwischen ES und AS1 hin. Das Muster bei den Maxima in Film 8 kann durch das Abziehen der HK1 bei ES von der HK1 bei AS1 erzeugt werden. Das Klassifizierungsmuster reflektiert die Verschiebung der Bewegung um 50 Ms zwischen ES und AS1. Bei dem Klassifizierungsbild verschwindet der weiße Punkt für kurze Zeit. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass das Klassifizierungsmuster nur aus schwarzen und weißen Pixeln besteht. Alle Grautöne werden in schwarz oder weiß umgewandelt. Die fehlenden Bewegungsabschnitte können auch die in schwarz umgewandelten schwachen Grautöne sein.

2.3.4 Visuelle Salienz der Sakkadenziele

Wie aus den obigen Abschnitten ersichtlich, werden die Sakkadenziele bei explorativen sowie bei Aufholsakkaden weitgehend durch die domänenallgemeinen Faktoren wie die Akteursdichte und die künftige Position des Akteurs bestimmt. In diesem Abschnitt sollen die domänenallgemeinen Faktoren näher betrachtet werden. Insbesondere wurde untersucht, wie salient (Itti & Baldi, 2009; Itti & Koch, 2000) die Sakkadenziele sind. Um die visuelle Salienz zu quantifizieren wurde das Modell von Itti und Koch (2000) verwendet. Laut Itti und Koch (2000) sind Orte mit homogenen visuellen Eigenschaften (gleiche Farbe, gleiche Form) weniger salient als inhomogene Orte. Zum Beispiel ist ein schwarzes Kleid unter vielen weißen Kleidern salienter und fällt schneller auf als dasselbe schwarze Kleid unter vielen schwarzen Kleidern. Itti und Koch (2000) zeigten, dass das Salienzmodell menschliches Blickverhalten in kontrollierten Experimenten sowie bei der freien Suche gut vorhersagt. Das ursprüngliche Modell postuliert drei Salienzquellen: Farbe, Kontrast und Kante-

nausrichtung. Das Modell wurde später um zwei weitere Saliensquellen - Bewegung und Flimmern erweitert (Itti & Baldi, 2009). Die Stimuli in dieser Studie unterscheiden sich nicht bezüglich ihrer Farbe oder Ausrichtung und sie flimmern auch nicht. Es wurde daher nur die Kontrast- und Bewegungssaliens der Stimuli betrachtet. Die Saliens wurde mit der auf Laurent Ittis Website verfügbaren Software berechnet: <http://ilab.usc.edu/toolkit/>. Zusätzlich zur Saliens wurde die Ringdichte und die Häufigkeit der Bewegungsänderungen gemessen. Diese zwei Maße dienten jeweils als Input für die Berechnung der Kontrast- und Bewegungssaliens. Es konnten wieder kurze Filme konstruiert werden, welche die durchschnittliche Saliens oder Ringdichte zeigen. Diesmal wurden jedoch keine zeitlich und räumlich variierenden Muster gesucht, was die Ergebnisdarstellung vereinfacht. Zum einen wurde die durchschnittliche Ringdichte in dem Zeitabschnitt 15 Ms vor und 15 Ms nach dem Sakkadenanfang in Abhängigkeit von der Entfernung zum Sakkadenziel aufgezeigt. Dazu wurde die Ringanzahl in ringförmigen konzentrischen Streifen (0.5 Grad Streifenbreite) aufsummiert. Die Ringanzahl wurde durch die Streifenfläche geteilt. Die Ringdichte war definiert als die Anzahl der Ringe pro ein Grad Quadratfläche. Zum andern wurde die durchschnittliche Ringdichte in dem Umkreis von 0.5 Grad um das Sakkadenziel in Abhängigkeit der Zeit berechnet. Diese zwei Darstellungsformen wurden zusätzlich genutzt um jeweils die Kontrastsaliens, die Bewegungssaliens und die Häufigkeit der Bewegungsänderungen darzustellen.

Die Ergebnisse der Saliensanalysen der explorativen Sakkaden werden in Abbildung 2.3 gezeigt. Die vier Reihen in der Abbildung zeigen die Ringdichte, die Häufigkeit der Bewegungsänderungen, die Kontrastsaliens und die Bewegungssaliens. Die erste Spalte (A-D) zeigt diese Maße in Abhängigkeit von der Entfernung zum Sakkadenziel. Die zweite Spalte zeigt die zeitliche Entwicklung. Die Ringdichte sinkt mit der Entfernung zu dem Sakkadenziel und die Ringdichte sinkt auch mit der zeitlichen Entfernung zu dem Sakkadenanfang. Die explorativen Sakkaden der Versuchsperson 1 zeigen die höchste Genauigkeit. Die Sakkaden der Versuchsperson 4 sind dagegen ungenau. Um diesen Unterschieden einen Kontext zu geben, zeigt der hellgraue Streifen das Konfidenzintervall für eine Kontrollberechnung. Bei dieser Berechnung wurden die ES Daten von Versuchsperson 4 verwendet. Allerdings wurden die Sakkadenanfänge zufällig zu dem Sakkadenziel zugeordnet. Die zeitliche Verteilung der Sakkadenanfänge sowie die räumliche Verteilung der Sakkadenziele ist dieselbe. Die Position wurde jedoch mit einem anderen Zeitpunkt zufällig gekoppelt. Für die Kontrollberechnung wurde ein Konfidenzintervall berechnet. Für die Ringdichte wurde das Intervall mit der

Student-t-Verteilung berechnet. Im Falle der Richtungsänderungen wird eine Binomialverteilung angenommen. Um das Konfidenzintervall für die Salienz zu berechnen wurde die Kontrollberechnung hundert mal mit unterschiedlicher (zufälligen) Kopplung wiederholt. Anhand der Wiederholungen wurde ein 95% Intervall berechnet. Das Konfidenzintervall wird als hellgrauer Streifen dargestellt.

Das Konfidenzintervall in den Zellen A und D ist sehr schmal und der hellgraue Streifen erscheint als eine hellgraue gerade Linie. Die Ringdichte ist 4 Grad um das Sakkadenziel und 200 Ms vor und nach dem Sakkadenanfang überzufällig groß. Anders ist es in den Zellen B und E. Hier umfasst das Konfidenzintervall die bei den Versuchspersonen gemessenen Werte. Die Anzahl der Bewegungsänderungen am Sakkadenziel oder zum Sakkadenanfang ist nicht erhöht. Die hohe Variabilität der Messwerte und das breite Konfidenzintervall lassen aber kleinere Unterschiede nicht ausschließen. Zum Beispiel wäre eine Erhöhung der Häufigkeit um eine Bewegungsänderung pro Sekunde nennenswert, da die Ringe nur 6 Bewegungsänderungen pro Sekunde machen. Eine solche Erhöhung wäre anhand der hier präsentierten Daten nur schwer erkennbar. Die dritte Reihe (C und F) zeigt die Kontrastsalienz. Die Ergebnisse sind qualitativ ähnlich zu den Ergebnissen der Ringdichte. Dies ist nicht überraschend, da die Kontrastsalienz auf der Ringdichte basiert. Bei der Kontrastsalienz kommt lediglich noch eine nicht-lineare Gewichtung hinzu. Diese Gewichtung ändert/verschiebt den Zeitpunkt der Maxima der Ringdichte nicht. Die Bewegungssalienz zeigt ähnliche Maxima. Da sich alle Ringe auch bewegen wird die Bewegungssalienz bei hoher Ringdichte auch hoch sein. Bewegungsänderungen können auch zur Bewegungssalienz beitragen. Es besteht leider keine Möglichkeit, diese zwei Quellen der Bewegungssalienz zu trennen.

Abbildung 2.4 zeigt dieselbe Auswertung mit den AS1. Die Ergebnisse sind ähnlich zu den Ergebnissen von ES. Es fällt auf, dass das Maximum bei der Ringdichte und teilweise bei der Kontrastsalienz um 40-60 Ms verschoben ist. Das entspricht den Ergebnissen aus den Musteranalysen der Sakkadenziele, wo auch festgestellt wurde, dass das Sakkadenziel zeitlich verschoben ist.

Die Versuchspersonen richten die explorative Sakkaden sowie die Aufholsakkaden auf die Gebiete mit vielen Ringen. Gebiete mit hoher Ringdichte sind gleichzeitig auch Gebiete mit hoher Kontrast- und Bewegungssalienz. Man kann sich fragen, ob die Unterscheidung zwischen explorativen und Aufholsakkaden überhaupt sinnvoll ist. ES sowie AS fokussieren Gebiete mit hoher Ringdichte. AS ist in Kontrast zu ES prädiktiv, was man von Aufholsakkaden erwarten würde. Dieser Unterschied zeigt,

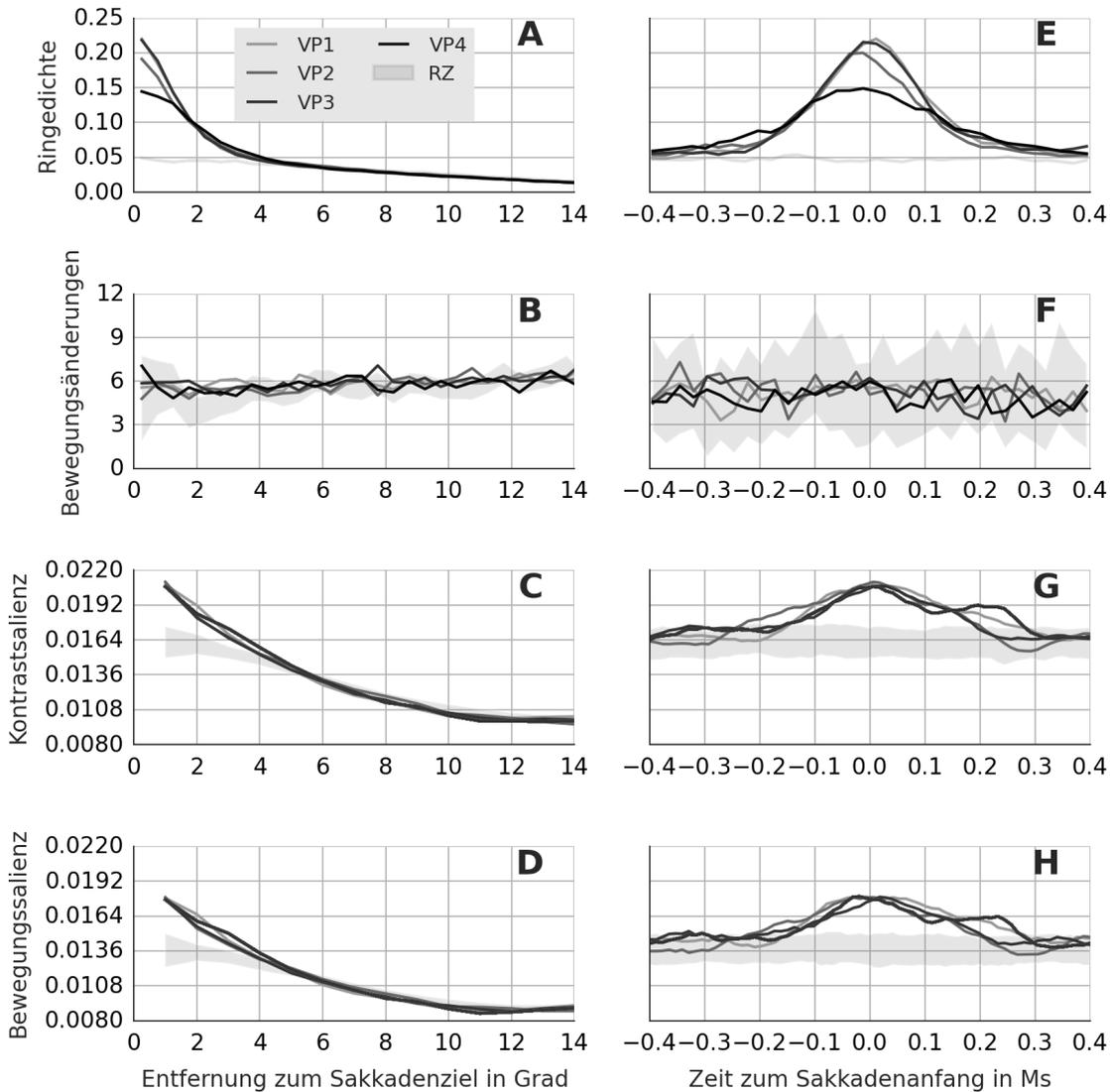


Abbildung 2.3: Die vertikale Achse in den Zellen zeigt jeweils die Ringdichte (A, E), die Häufigkeit der Bewegungsänderungen (B, F) und die Salienz (C, D, G, H) der Sakkadenziele der explorativen Sakkaden. Die waagerechte Achse zeigt die radiale Entfernung von dem Sakkadenziel in Grad (A-D) und die Zeit zum Sakkadenanfang in Ms (E-H). Ringdichte wird als Anzahl der Ringe pro ein Grad Quadratfläche angegeben. Die Häufigkeit der Bewegungsänderungen gibt die Anzahl der Bewegungsänderungen pro Ring und pro Sekunde. Die Salienzwerte sind normiert, so dass sie auf dem Intervall $[0, 1]$ liegen. RZ - der hellgraue Streifen zeigt das Konfidenzintervall einer Kontrollberechnung bei welcher die Zuordnung der Sakkadenzeiten und Sakkadenorte randomisiert wurde.

dass die Unterscheidung zwischen AS und ES gerechtfertigt ist. Die Unterscheidung

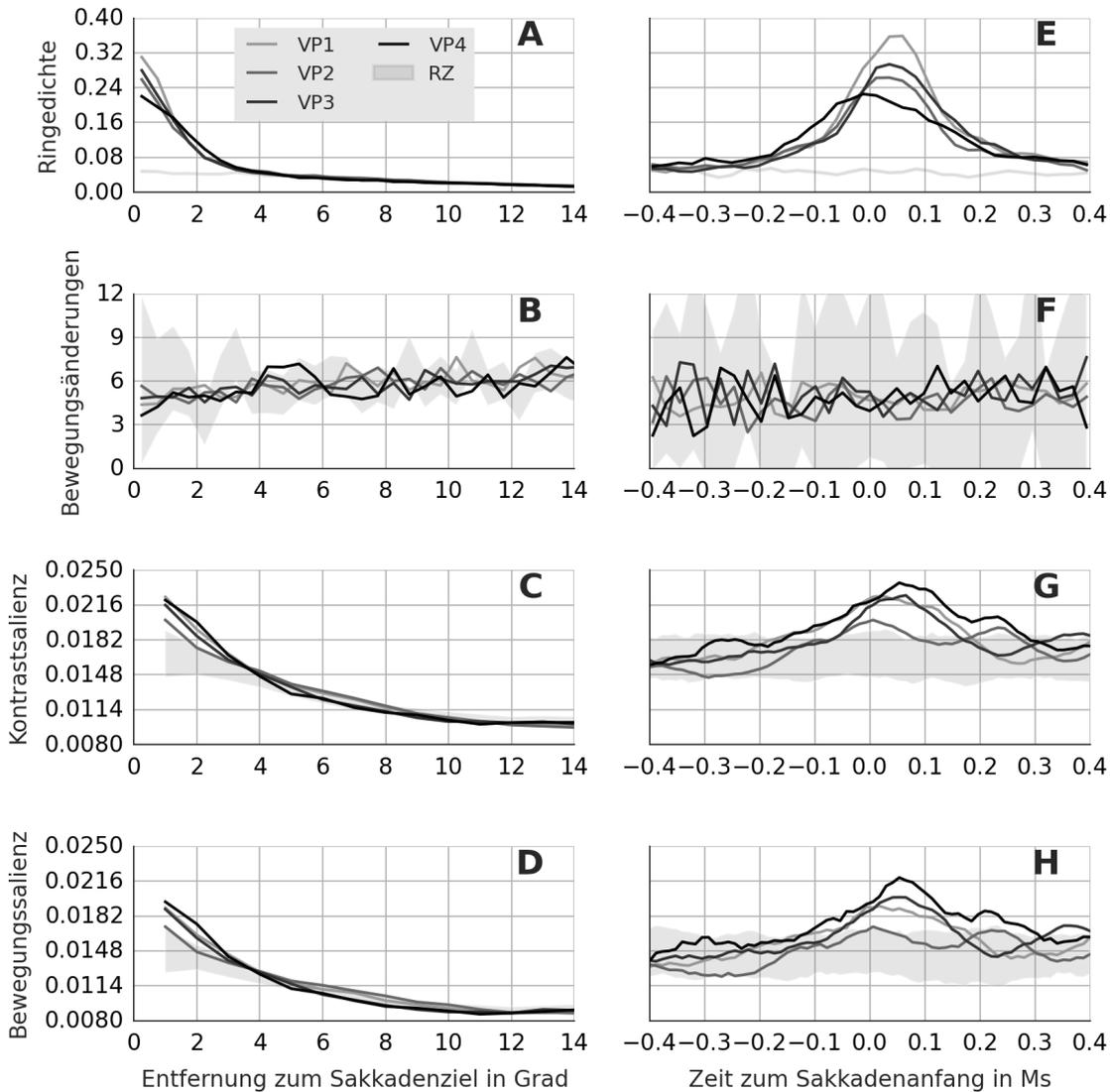


Abbildung 2.4: Die Zellen zeigen die Ringdichte (A, E), Häufigkeit der Bewegungsänderungen (B, F) und die Salienz (C, D, G, H) der Sakkadenziele der AS1. Die Anordnung dieser Abbildung ist identisch zu der Anordnung der Abbildung 2.3. Weitere Details können der Beschriftung der Abbildung 2.3 entnommen werden.

wurde richtig operationalisiert und die AS und ES wurden richtig identifiziert. Falls die Sakkaden nicht zur Verfolgungsentdeckung beitragen, muss die Entdeckung während der Phasen der glatten Augenbewegung erfolgen. Die im nachfolgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse zeigen, welche Bewegung während der glatten Augenbewegung fokussiert wird.

2.3.5 Musteranalysen der glatten Augenbewegungen

Die glatte Augenbewegung hilft, die Bewegung der Akteure auf der Retina zu stabilisieren. Sie ermöglicht eine bessere Betrachtung und Beurteilung der Merkmale dieser Akteure. In diesem Teil geht es um die Auswertung dessen, welche Bewegungsmerkmale während der glatten Augenbewegungen betrachtet werden. Als eine glatte Augenbewegung wird der Abschnitt zwischen zwei Aufholsakkaden definiert. Es wurden wieder Ausschnitte mit dem Blickpunkt in der Mitte gebildet. Die größte Schwierigkeit stellt dabei die unterschiedliche Länge der glatten Augenbewegungen. Bei Ausschnitten mit unterschiedlicher Länge lässt sich die Hauptkomponentenanalyse nicht anwenden. Die Ausschnitte wurden gemittelt und entweder am Anfang oder am Ende aneinander gekoppelt. Wegen unterschiedlicher Länge konnten die Ausschnitte nicht gleichzeitig am Anfang und am Ende gekoppelt werden. Als unmittelbare Folge variiert die Anzahl der Ausschnitte, die zu dem Durchschnitt beitragen, zwischen den Einzelbildern des Durchschnittsmusters. Glatte Augenbewegungen bieten auch Vorteile für die Musteranalyse. Der Blick bewegt sich über die gesamte Zeit und die Richtung der Blickbewegung kann verwendet werden, um die Ausschnitte zu rotieren, so dass die Ausrichtung der Bewegung übereinstimmt. Unter Anwendung der beschriebenen Prozedur resultiert ein Durchschnittsmuster, welches eine Hintergrundbewegung (entgegen der Blickrichtung) zeigt. Die verfolgten Akteure sind kaum erkennbar. Die Hintergrundbewegung entsteht aus den Akteuren, die zwar nicht mit Blick verfolgt werden, die aber trotzdem den Blickweg kreuzen. Der Blick bewegt sich von diesen Akteuren weg. Damit entsteht eine Hintergrundbewegung. Um die Hintergrundbewegung zu vermeiden, werden für die Mittelung Ausschnitte verwendet, die nur die verfolgten Akteure zeigen. Die verfolgten Akteure wurden während der Identifizierung der Grundzustände bestimmt. Da die Anzahl der Akteure, die zu dem Ausschnitt gehören bekannt ist, kann eine effizientere Mittelungsprozedur verwendet werden. Diese repräsentiert einen Ausschnitt nicht als eine Bildfolge sondern als eine Menge von Trajektorien. Jede Trajektorie beschreibt die Bewegung eines Akteurs. Die Trajektorie ist lediglich eine Abfolge der Positionskoordinaten des Akteurs. Das Muster wird bestimmt als $I(x, y, t) = \frac{1}{N} \sum_n w_n([x - x_{n,t}, y - y_{n,t}])$. $I(x, y, t)$ ist der Wert des Pixels mit Koordinaten x, y im t -ten Bild in der Bildfolge. n indiziert alle verfolgten Akteure aus allen Ausschnitten. $x_{n,t}, y_{n,t}$ sind die Koordinaten des Akteurs im t -ten Bild. $w_n(\mathbf{h}) \sim \exp(-\frac{1}{2}\mathbf{h}^T \Sigma^{-1} \mathbf{h})$ ist die Gauß-Funktion. Diese Funktion dient der Glättung. Σ bestimmt den Ausmaß der Glättung. Der Ausmaß der Glättung ist ähnlich der Glättung, die bei den pixelbasierten Musteranalysen verwen-

det wurde. Die aufgeführte Berechnung entspricht einer nicht-parametrischen Regression mit Gaußischem Kernel (siehe Absatz 20.4 in Wasserman, 2004). Diese Prozedur ist rechentechnisch schneller als eine pixelbasierte Berechnung da jeder Ausschnitt durch $2 \times A \times T$ Werte (A - Anzahl der Akteure, T - Anzahl der Bilder) anstatt durch $P \times P \times T$ Werte (P - die Auflösung der Ausschnitte in Pixeln) repräsentiert wird. Film 9 zeigt die Durchschnittsmuster für Ausschnitte, die am Anfang gekoppelt wurden. Es wurden die Muster für Ausschnitte mit einem, zwei und mehr als zwei Akteuren getrennt berechnet. Diese werden in den Spalten in Film 9 gezeigt. Die Reihen zeigen die Ergebnisse für die vier Versuchspersonen. Die erste Spalte zeigt einen Akteur, der sich 0 bis 1 Grad vor dem Blickpunkt bewegt. Die dritte Spalte zeigt eine breite Punktwolke. Die zweite Spalte zeigt zuerst einen Akteur. 200 Ms nach Beginn der glatten Augenbewegung kommt bei Versuchsperson 2, 3 und 4 ein zweiter Akteur hinzu, und es entsteht ein Muster, das bereits bei den Analysen des Entscheidungszeitpunktes zu beobachten war (Film 3 und 4). Bei Versuchsperson 1 zeigt sich wieder ein Muster mit Akteuren vor und hinter dem Akteur in der Mitte. Gegen Ende des Durchschnittsmusters sinkt die Anzahl der Ausschnitte, die zum Durchschnitt beitragen, und die Bewegung der einzelnen Akteure wird erkennbar. Damit fällt es schwer, Aussagen über die Bewegungsmuster gegen Ende einer glatten Blickbewegung zu treffen. Es wurde eine weitere Musteranalyse durchgeführt. Bei dieser Analyse sind die Ausschnitte am Ende gekoppelt. Die Durchschnittsmuster der Ausschnitte mit zwei verfolgten Akteuren werden in der dritten Spalte in Film 10 gezeigt. Um den Vergleich einfacher lesbar zu machen, wird in der ersten Spalte in Film 10 die zweite Spalte aus Film 9 nochmals gezeigt. Die Muster in der ersten und der dritten Spalte sind ähnlich. Allerdings zeigen die Muster in der dritten Spalte bei Versuchsperson 2, 3 und 4 einen Akteur 200 Ms vor dem Ende anstatt 200 nach dem Anfang. Der vordere Akteur wird stärker am Anfang und der hintere Akteur stärker gegen Ende fokussiert. Während der glatten Augenbewegung kommt es zu einem Blickwechsel. Der Blick folgt zuerst dem vorderen Akteur, wechselt dann aber zum hinteren Akteur. Dieser Wechsel wird besser erkennbar wenn die Ausschnitte in der Mitte (genau zwischen Anfang und Ende) gekoppelt werden. Die entsprechenden Durchschnittsmuster werden in Spalte 2 in Film 10 gezeigt.

Der Wechsel wurde mit Hilfe der Schienendiagramme näher untersucht. Die Schienendiagramme der Muster in Film 10 werden in Abbildung 2.5 gezeigt. Versuchsperson 1 verfolgt einen einzelnen Akteur mit Blick 0-1 Grad hinter dem Akteur. Film 11 illustriert die Blickverfolgungsstrategie von Versuchsperson 1 anhand eines Trials.

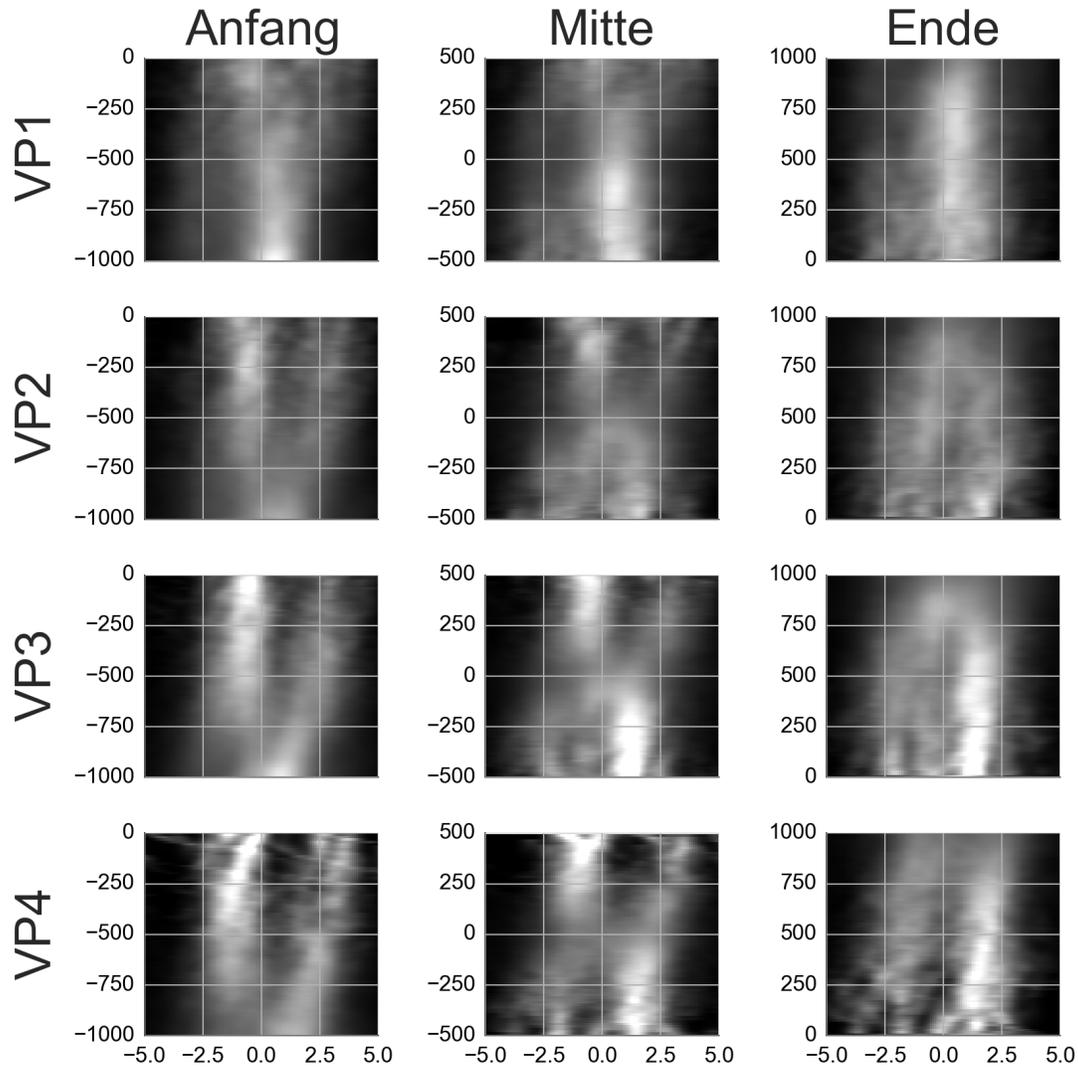


Abbildung 2.5: Schienendiagramme zeigen die Durchschnittsmuster der glatten Augenbewegungen aus Film 10. Jede Reihe zeigt die Ergebnisse für eine der vier Versuchspersonen. Die drei Spalten zeigen die Durchschnittsmuster mit der Kopplung jeweils am Anfang, in der Mitte und am Ende der glatten Augenbewegung. Die Anordnung der Graphen in jeder Zelle ist ähnlich zu den Schienendiagrammen in Abbildung 2.2. Die senkrechte Achse zeigt die Zeit bis zum Anfang, zur Mitte oder bis zum Ende der glatten Augenbewegung in Millisekunden. Die waagerechte Achse zeigt die Entfernung (auf der senkrechten Achse in Film 10) zum Blickpunkt in Grad.

Versuchsperson 1 verfolgt die einzelnen Akteure und wechselt zwischen diesen mit Hilfe von Aufholsakkaden. Die anderen Versuchspersonen verfolgen die Akteure als Gruppe. Sie richten die Aufholsakkaden zur Beute und wechseln allmählich zum Jäger. Dieser Wechsel wird erreicht indem die Geschwindigkeit der glatten Augenbewegung

um ca. 2 Grad pro Sekunde langsamer gesetzt wird als die Geschwindigkeit der Akteure. Wie die Abbildung 2.6 zeigt, ist die glatte Augenbewegung bei Versuchsperson 1 um ein Grad pro Sekunde schneller als bei den anderen Versuchspersonen. Die Filme 1 und 12 zeigen zusätzlich, dass die beiden Strategien auch kombiniert werden. Die Versuchspersonen 2, 3 und 4 verfolgen einzelne Akteure wenn sich diese weit voneinander entfernen. Versuchsperson 1 verfolgt die Akteure als Gruppe, wenn sich diese nahe kommen oder wenn sie sich glatt bewegen.

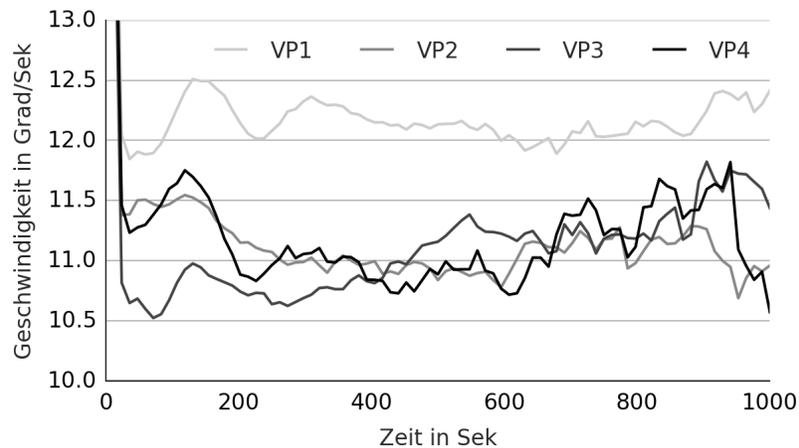


Abbildung 2.6: Median der Blickgeschwindigkeit während der glatten Augenbewegung in Grad pro Sekunde. Die waagerechte Achse zeigt die Zeit seit dem Anfang der glatten Augenbewegung in Millisekunden.

2.3.6 Reaktionszeiten und Genauigkeit

Vollständigkeitshalber werden die Reaktionszeiten sowie die Genauigkeit der Entdeckung berichtet. Die Reaktionszeiten wurden mit Hilfe eines log-normalen Modells $\log(y_i) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma)$ analysiert. y_i ist die Reaktionszeit im Trial i und μ und σ wurden geschätzt. Die Schätzung wurde mit der STAN Software (<http://mc-stan.org>) durchgeführt. Es wurde jeweils ein getrenntes Modell für jede Versuchsperson und für jeden von den zwei Trialtypen geschätzt. Zur Erinnerung, die beiden Trialtypen sind Trials mit eingeschränktem Mindestabstand der Beute zum Jäger (ME), und Trials ohne diese Einschränkung (OE). Abbildung 2.7 A zeigt die Ergebnisse der Schätzung (schwarze Linie) zusammen mit den Daten (Histogramm) aus den ME Trials der Versuchsperson 1. Abbildung 2.7 A zeigt eine gute Passung zwischen dem lognormalen Modell und den gemessenen Reaktionszeiten. Abbildung 2.7 B und C zeigen

die durchschnittliche Reaktionszeit ($= \exp(\mu + \sigma^2/2)$) jeweils für ME und OE Trials. Die Versuchspersonen brauchen 2-4 Sekunden länger in den selteneren OE Trials. Als nächstes wurde die Wahrscheinlichkeit dafür geschätzt, dass die zwei von der

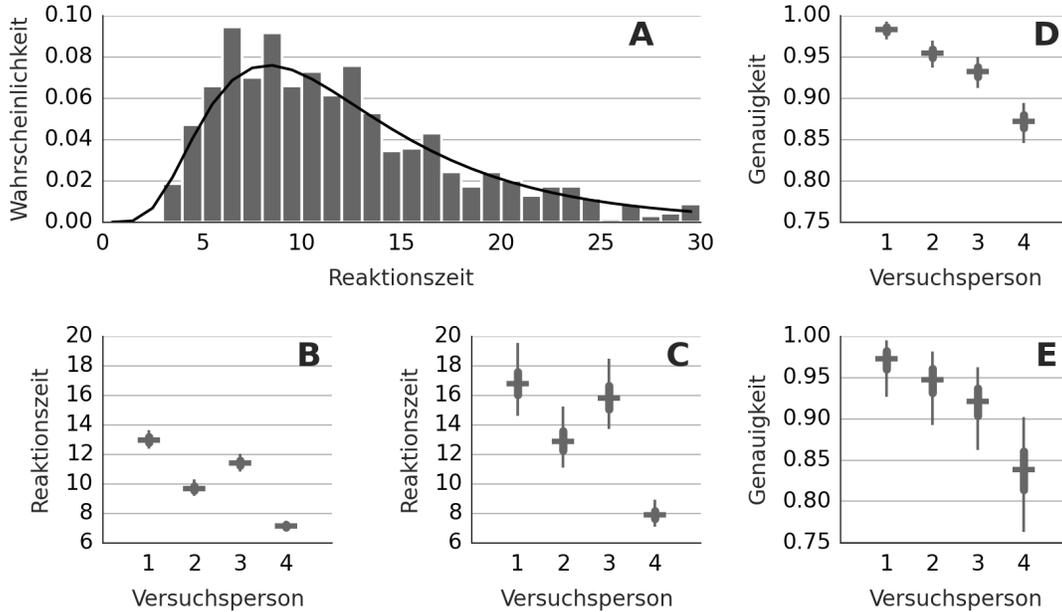


Abbildung 2.7: A - Histogramm der Reaktionszeiten der Versuchsperson 1. Die schwarze Linie zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das geschätzte Modell. B und C - erwartete Reaktionszeit. D and E - erwartete Genauigkeit. B und D - Trials mit eingeschränktem Mindestabstand. C und E - Trials ohne eingeschränkten Mindestabstand. Die Fehlerbalken zeigen den Medianwert (waagerechte Linie) und den 50% (dicke senkrechte Linie) und 95% (dünne senkrechte Linie) Intervall.

Versuchsperson entdeckten und angezeigten Akteure tatsächlich der Beute und dem Jäger entsprechen. Die Erfolge wurden als eine binäre Variable (richtige Entdeckung, falsche Entdeckung) mit der Bernoulliverteilung modelliert. Es wurde der Wahrscheinlichkeitsparameter der Bernoulliverteilung jeweils für die ME und OE Trials und jeweils für jede Versuchsperson geschätzt. Dieser Parameter wird Genauigkeit genannt. Abbildung 2.7 D und E zeigt die Genauigkeit in ME und OE Trials. Die Versuchspersonen sind ungenauer in den OE Trials. Wegen der kleineren Anzahl der OE Trials sind die Schätzwerte bei diesen Trials ungenauer.

Es sind zusätzlich Unterschiede zwischen den Versuchspersonen und deren Suchstrategien sichtbar. Versuchsperson 1 ist genau und langsam. Versuchsperson 4 ist schnell aber ungenau. Es gibt scheinbar einen Austausch zwischen Genauigkeit und Schnelligkeit der Entdeckung. Was ist die Quelle für diesen Austausch? Abbildung

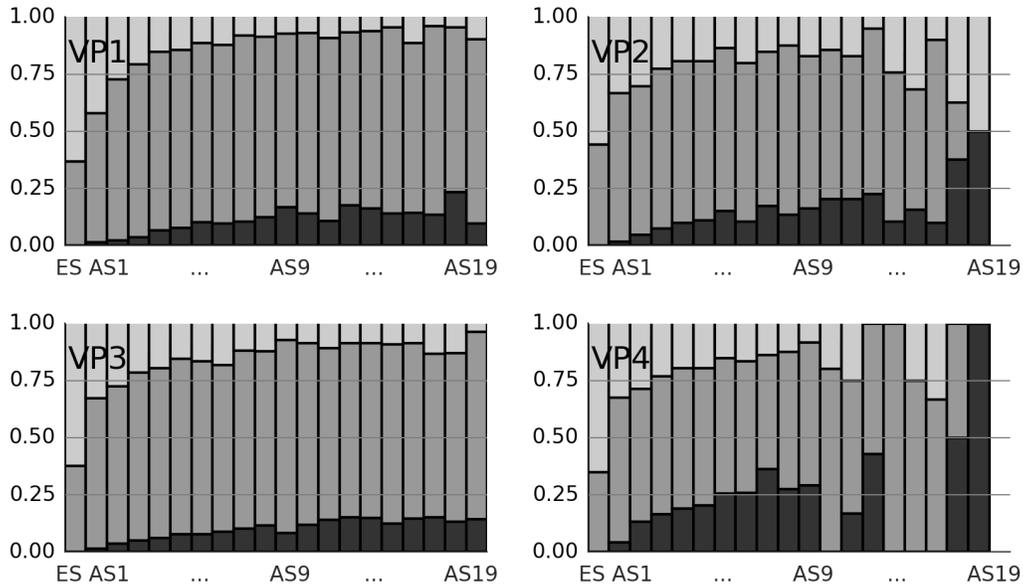


Abbildung 2.8: Anteil der Sakkaden die von einem Tastendruck (schwarz), von einer ES (hellgrau) oder von einer AS (dunkelgrau) gefolgt werden. Jede Zelle zeigt die Ergebnisse für jeweils eine Versuchsperson. Die waagerechte Achse zeigt die explorativen und die Aufholsakkaden in ihrer logischen Reihenfolge. Um ein Beispiel zu nennen, die Hälfte der AS18 der Versuchsperson 2 wird von einer explorativen Sakkade gefolgt. Die andere Hälfte wird von einem Tastendruck gefolgt.

2.8 zeigt anteilig, wie viele Sakkaden des jeweiligen Typs von einer explorativen Sakkade (hellgrau), von einer Aufholsakkade (dunkelgrau) oder von einem Tastendruck (schwarz) gefolgt werden. Explorative Sakkade und Tastendruck stellen zwei Möglichkeiten dar, eine Blickverfolgung zu beenden. Die Wahrscheinlichkeit für einen Tastendruck steigt mit der Dauer der Verfolgung. Die Wahrscheinlichkeit für explorative Sakkade sinkt dagegen. Versuchsperson 4 zeigt einen kleineren Anteil an Aufholsakkaden. Versuchsperson 4 beendet die Blickverfolgung schnell, was zu schnelleren Reaktionszeiten führt. Versuchsperson 1 zeigt dagegen einen hohen Anteil der Aufholsakkaden, was zur längeren Blickverfolgung führt. Die Dauer der glatten Augenbewegungen ist ebenfalls unterschiedlich. Die glatte Augenbewegung von Versuchsperson 1 dauert durchschnittlich 385,9 Ms. Bei Versuchsperson 4 dauert die glatte Augenbewegung nur 288,7 Ms. Versuchsperson 4 machte im Schnitt 17,9 Aufholsakkaden pro Trial. Die um ca. 100 Ms längere Dauer der glatten Augenbewegungen entspricht bei ca. 18 Aufholsakkaden pro Trial einem Reaktionszeitunterschied von 1,8 Sekunden. Die Reaktionszeit von Versuchsperson 4 ist um ca. 7 Sekunden schneller. Dieser Unterschied geht vorwiegend auf die unterschiedliche Wahrscheinlichkeit zurück, die

Blickverfolgung zu beenden.

Änderte sich die Genauigkeit im Laufe des Versuchs? Abbildung 2.9 zeigt die durchschnittliche Genauigkeit über nachfolgende Gruppen von zehn Trials. Die Versuchspersonen sahen diese Genauigkeitsangabe jeweils nach zehn Trials. Die Abbildung zeigt die ersten 6 Blöcke. Am Anfang des Versuchs wird die Verfolgung in 3 oder 4 von 10 Trials richtig erkannt. Obwohl Versuchsperson 1 bereits 8 von 10 Trials richtig erzielte, hatte sie gleich danach nur 4 von 10 richtig. Alle Versuchspersonen verbesserten schnell ihre Leistung und erreichten nach kurzer Zeit eine Genauigkeit von 90%. Dabei ist zu beachten, dass es wegen der stochastischen Erzeugung der Verfolgung nicht möglich ist, die Verfolgung deterministisch zu bestimmen. Es ist somit kaum möglich, 100% Genauigkeit zu erreichen. Die Genauigkeit von ca. 90% stellt wahrscheinlich die obere Leistungsgrenze dar. Die fehlende Vertrautheit mit der Aufgabe kann vermutlich 2 oder 3 Fehler zu Beginn erklären. Die fehlende Vertrautheit kann aber nicht die insgesamt schlechte Anfangsleistung erklären.

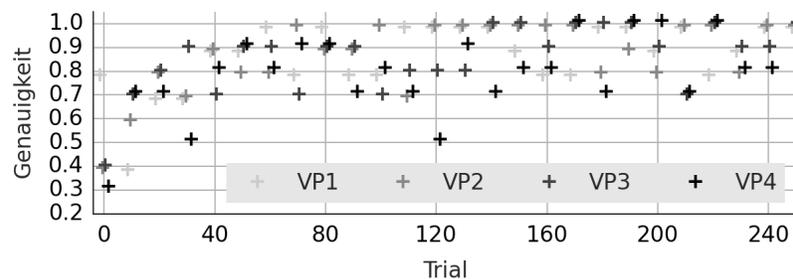


Abbildung 2.9: Genauigkeit in den ersten 240 Trials. Die senkrechte Achse zeigt die Rückmeldung über die Genauigkeit, die die Versuchspersonen nach allen zehn Trials erhalten haben. Die waagerechte Achse zeigt den zeitlichen Verlauf. VP1, VP2, VP3 und VP4 - Daten der vier Versuchspersonen.

2.3.7 Musteranalysen der Stimuli

Die Muster zum Entscheidungszeitpunkt sowie die Muster während der glatten Augenbewegung zeigen zwei Punkte die sich nacheinander im Abstand von ca. 3,5 Grad in derselben Richtung bewegen. Ein solches Muster ist nicht unerwartet, wenn man bedenkt wie die Verfolgungsbewegung erzeugt wurde. Zusätzlich erkennen die Versuchspersonen die algorithmisch erzeugte Verfolgung als Verfolgung in 83 bis 97% der Trials. Es wurde auch dargestellt, dass die hohe Genauigkeit erst innerhalb der ersten Trials erreicht wird. Damit erhebt sich der Verdacht, dass die Versuchspersonen die

Entdeckungsaufgabe nicht mit Hilfe ihres Vorwissens über die Verfolgungsbewegung oder mit Hilfe der domänenspezifischen kognitiven Mechanismen entdecken. Die Versuchspersonen scheinen eher zu lernen auf welche Bewegung sie achten sollen, so dass sie die Entdeckungsrate maximieren. Wie in der Einführung erwähnt, kann man dieser Frage mithilfe zusätzliche Musteranalysen nachgegangen werden. In diesem Absatz soll es um die Berechnung der Muster gehen, welche die Bewegung des Jägers und der Beute beschreiben.

Die Identität des Jägers und der Beute ist gegeben durch den Algorithmus der zur Erzeugung der Bewegung verwendet wurde. Diese Identität wurde auch benutzt um die Genauigkeit auszuwerten und um der Versuchsperson alle zehn Trial eine Rückmeldung zu geben. Die Musteranalyse in diesem Teil ist methodologisch ähnlich zu der Musteranalyse der Sakkadenziele. Statt des Sakkadenzieles wurde der Mittelpunkt zwischen der Beute und dem Jäger als Ausschnittmitte gewählt. Die genaue Position ist dabei nicht entscheidend. (Die Position des Jägers könnte ebenso zur Zentrierung verwendet werden). In diesem Absatz ist lediglich die relative Bewegung von Interesse. Wichtig ist, dass sich beide Akteure innerhalb des 10×10 Grad räumlichen Fensters befinden. Der Zeitpunkt für jeden Ausschnitt wurde zufällig gewählt und der Ausschnitt beginnt 400 Ms vor und endet 400 Ms nach diesem Zeitpunkt. Wie bei der Musteranalyse der Sakkaden wird der Modus des Histogramms berechnet, um die dominante Ausrichtung zu finden und um nachfolgend die Ausschnitte zu rotieren. Es werden die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse dargestellt.

Die ersten fünf Hauptkomponenten, die den höchsten Varianzanteil erzielt haben, werden in Film 12 gezeigt. Die HK1 in der ersten Zelle zeigt die Verfolgungsbewegung. Mit Hilfe der Schienendiagramme (nicht abgebildet) wurde der Abstand und die Geschwindigkeit ermittelt. Der Abstand der zwei Akteure beträgt 3,43 Grad. Die Beute bewegt sich mit 13,99 Grad pro Sekunde. Der Jäger bewegt sich mit 13,93 Grad pro Sekunde. Während HK1 die häufigeren ME Trials beschreibt, erklärt die HK2 die Verfolgungsbewegung in den OE Trials. Die restlichen drei Komponenten zeigen unterschiedliche Varianten der kreisförmigen Bewegung. Diese Komponenten sind auch nicht unerwartet, da sich das Verfolgungspaar meistens kreisförmig nahe dem äußeren Rand der Bewegungsfläche bewegt. Ob die Bewegung im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn erfolgt, kann durch die entsprechende Umpolung der Komponente bestimmt werden. Die letzte Reihe in Tabelle 2.2 zeigt den Varianzanteil dieser Komponenten. Obwohl alle Ausschnitte die Verfolgung genau zentrieren, erzielt HK1 nur 16,8%. Die Verfolgungsbewegung weicht damit oft von dem Muster in HK1 ab. Das

Muster der HK1 ist ähnlich zu dem Muster der HK1 bei der Entscheidung sowie den Durchschnittsmustern bei der glatten Augenbewegung. Beim Vergleich der jeweiligen Varianzanteile fällt der Varianzanteil der HK1 bei der Entscheidung im Vergleich zu der HK1 der verfolgungszentrierten Ausschnitte nicht gering aus. Die Musteranalysen bekräftigen den Verdacht, dass die Verfolgungsmuster eher die Bewegungseigenschaften der Stimuli als die Präferenzen oder das Vorwissen der Versuchspersonen widerspiegeln.

2.4 Diskussion

Die Ergebnisse der ersten Studie bieten einen detaillierten Einblick in das Suchverhalten der Versuchspersonen. Die Versuchspersonen suchen zwei Akteure, die sich hintereinander im Abstand von 3,5-3,8 Grad in derselben Richtung bewegen. Um Kandidaten für eine Verfolgungsbewegung zu finden, fokussierten die Versuchspersonen auf Gebiete mit hoher Ringdichte. Es wurden keine domänenspezifischen Merkmale gefunden, die zur Bestimmung dieser Kandidaten hätten dienen können. Es ist denkbar, dass die Versuchspersonen darauf achten, ob die hohe Ringdichte am Ziel der explorativen Sakkade anhält. Sollte dies der Fall sein, würde eine Blickverfolgung in diesem Gebiet starten. Andererseits ist es möglich, dass die Versuchspersonen bereits während der Fixation nach der explorativen Sakkade auf die Bewegung bestimmter Akteure achten, ohne den Blick an die Akteure zu koppeln. Ein solches Verhalten kann mit Hilfe der Musteranalysen nicht identifiziert werden. Während der Blickverfolgung konnten zwei Strategien festgestellt werden. Versuchsperson 1 wechselte den Blick zwischen den Akteuren, die sie verfolgte. Die Versuchspersonen 2, 3 und 4 verfolgten die Akteure als Gruppe. Diese Versuchspersonen richteten ihren Blick zur Beute und wechselten dann durch verlangsamte glatte Augenbewegung zum Jäger. Während der glatten Augenbewegung wird die Bewegung der Akteure beurteilt. Die Muster des Entscheidungszeitpunkts sind ähnlich zu den Mustern der glatten Augenbewegungen. Eine Evidenz für Verfolgung wird allmählich gesammelt. Bei Überschreiten eines bestimmten Grenzwerts wird die Taste gedrückt. Der graduelle Charakter der Entdeckung wird auch durch Abbildung 2.8 bestätigt. Falls die Versuchsperson auf ein einziges bestimmendes Merkmal achtet, sollte die Wahrscheinlichkeit für die Entdeckung über die nachfolgenden Aufholsakkaden konstant bleiben. Dies ist aber nicht der Fall, die Wahrscheinlichkeit steigt an.

Neben der allgemeinen Beschreibung des Suchprozesses wurden mit dieser Studie zwei

Hauptziele verfolgt. Zum einen sollte mit Hilfe von Musteranalysen versucht werden, die Bewegungsmerkmale zu bestimmen, die zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung beitragen. Zum anderen sollte versucht werden, die Rolle und den Beitrag der Augenbewegungen zu dieser Wahrnehmungsleistung zu bestimmen, so dass sich auch die Rolle domänenspezifischer Mechanismen besser bestimmen lässt. Im Weiteren sollen die Musteranalysen bewertet werden und diskutiert werden, inwieweit das erste Ziele erreicht wurde. Eine Bewertung des Beitrags dieser Studie zur Erreichung des zweiten Ziels soll erst im letzten Kapitel zusammen mit den Ergebnissen der Säuglingsstudie erfolgen.

2.4.1 Bewertung der Musteranalysen

Die Musteranalysen der Stimuli in Absatz 2.3.7 legen nahe, dass die Musteranalysen der Blickdaten keine Präferenzen oder Vorwissen über ein Verfolgungsereignis widerspiegeln, sondern die Bewegungseigenschaften der Stimuli wiedergeben. Damit ist es nicht gelungen, das Problem der früheren Forschungsgenerationen, welches sich aus der Hypothesen- und Stimuluswahl ergibt, zu beheben. Dennoch sollte auf zwei Fortschritte gegenüber den früheren Generationen hingewiesen werden. Erstens konnte diese Studie die Probleme durch die zusätzlichen Analysen in Absatz 2.3.7 identifizieren. Zweitens war die Wahl der Verfolgungsmuster durch die Versuchspersonen weniger abhängig von der Wahl der Stimuli, wie es in früheren Studien der Fall war. Zum einen wurden OE Trials eingeführt, um zu vermeiden, dass die Versuchspersonen den regelmäßigen Abstand zwischen der Beute und dem Jäger zur Entdeckung der Verfolgungsbewegung nutzen. Zum anderen wurde eine stochastische Rückmeldung gewählt, so dass sich die Versuchspersonen nicht zu stark an dieser orientieren. Dass die Versuchspersonen dennoch die Rückmeldung nutzten, deutet auf eine hohe Flexibilität der Entdeckungsleistung hin. Die Versuchspersonen hatten vermutlich eine Vorstellung davon, welche Bewegungsarten als Verfolgung zählen können. Diese Vorstellung scheint aber eher breit zu sein. Dies wird bei Betrachtung der frühen Trials ersichtlich, in welchen die tatsächliche Verfolgung nicht gefunden wurde. Versuchsperson 3 hat in den ersten 25 Trials 12 mal falsch geantwortet. Ihre Antwortgeschichte ist daher aufschlussreich. Film 13 zeigt einen frühen Trial dieser Versuchsperson. In diesem Trial wurde eine Annäherung als Verfolgung eingestuft. Eine Annäherung kommt in den gezeigten Stimuli selten vor, da sich die Akteure mit

gleicher Geschwindigkeit bewegen. Es kann trotzdem zu einer Annäherung kommen, wenn sich die Beute orthogonal zum Jäger bewegt. Ein anderer früher Trial (Film 14) zeigt zwei Akteure, die sich fast parallel bewegen. Diese Akteure wurden von Versuchsperson 3 ebenfalls als Verfolgung eingestuft.

Aufgrund dieser Flexibilität lässt sich nicht schlussfolgern, dass die Verfolgungsmuster in Film 3 und 11 die Vorstellung der Versuchspersonen über eine typische Verfolgungsbewegung wiedergeben. Es ist möglich, dass andere Stimuli zu anderen Ergebnissen geführt hätten. Wie bereits erwähnt, wechseln die Versuchspersonen zwischen den beiden Verfolgungsstrategien. Die Akteure werden einzeln verfolgt wenn sie weiter voneinander entfernt sind, oder wenn sich das Paar nicht fließend bewegt. Wäre die Bewegung der Beute und des Jägers so gewählt worden, dass diese zwei Akteure einen größeren Abstand zueinander halten, dann wäre vermutlich kein allmählicher Blickwechsel zu beobachten gewesen. Hätte man eine Aufgabe gewählt, in welcher eine schnelle Antwort gefragt wird oder die langsamere Bewegungen und/oder weniger Akteure zeigt, so wären Verfolgungsmuster auch durch einzelne Sakkaden zu finden gewesen. Wenn wiederum den Sakkaden eine wichtigere Rolle zukommt, dann könnten auch domänenspezifische Mechanismen der Sakkadensteuerung hilfreich werden. Diese Mechanismen sind dann gefragt, und damit eher genutzt und besser messbar. Alle genannten Beispiele illustrieren, dass sich die Stimulus- und Aufgabenwahl stark auf die Merkmale des Entdeckungsprozesses auswirken können. Was diese Feststellung für die Erforschung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung und insbesondere für der Entwurf der künftigen Studie bedeutet, wird in dem letzten Kapitel diskutiert.

Kapitel 3

Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei Säuglingen

3.1 Einleitung

Die zweite Studie der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei Säuglingen. Der methodische Ansatz aus der ersten Studie lässt sich nicht eins zu eins übernehmen, weil die für Musteranalysen notwendigen Datenmengen in den Experimenten mit Säuglingen oder Kindern nicht erreicht werden können. Es wird daher auf das übliche hypothesengeleitete Vorgehen zurückgegriffen. Es werden einige relevante Faktoren anhand der Literatur bestimmt und systematisch experimentell variiert.

Wie in der ersten Studie wurde auch in der Säuglingsstudie das Blickverhalten mit Hilfe von Eyetracking untersucht, um Erkenntnisse über den Beitrag domänenallgemeiner Mechanismen zu erhalten. Das Blickverhalten der Säuglinge wurde ebenfalls in unterschiedliche Zustände aufgeteilt. Die Dauer und die Abfolge dieser Zustände wurde analysiert.

Zusätzlich wurde ein alternatives Versuchsdesign entworfen und implementiert, das eine bessere Möglichkeit bietet, die domänenspezifischen Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung zu identifizieren. Dieses Versuchsdesign wurde so gewählt, dass die Interpretationsprobleme üblicher Habituerungs- und visueller Präferenzmaße möglichst vermieden wurden. Es wurde ein operantes Konditionierungsverfahren eingesetzt, um die Säuglinge zu motivieren, aktiv nach einem Beute-Jäger Paar unter den Distraktoren zu suchen. Die Bewegung des Verfolgungspaares und der Distraktoren

wurde ähnlich wie in der Erwachsenenstudie erzeugt. Das Blickverhalten wurde im Laufe des Versuchs ausgewertet. Falls der Säugling die Verfolgung für längere Zeit betrachtete, wurde eine Belohnung gezeigt: das Verfolgungspaar fing an, violett zu flimmern. Um das für den Säugling interessante Flimmern wieder zu erzeugen, musste der Säugling den Zusammenhang zwischen dem Flimmern und der Verfolgungsbewegung erkennen. Die Verfolgungsbewegung wurde so lange präsentiert, bis die Säuglinge die flimmernde Verfolgung mindestens drei Mal gesehen hatten. In den nachfolgenden Trials wurde die Belohnung nur jedes zweite Mal gezeigt. Es wurde untersucht, ob die Belohnung die Bereitschaft der Säuglinge steigerte, die Verfolgung zu fokussieren. Insbesondere wurde überprüft, ob die Säuglinge bei Testtrials ohne Flimmern längere Blickzeiten aufwiesen, wenn davor eine Belohnung gezeigt worden war.

Es wurden mehrere Kontrollbedingungen erhoben. Eine zusätzliche Säuglingsgruppe (Kontrollgruppe) bekam nur Verfolgungsbewegungen ohne Flimmern gezeigt. Ein Vergleich zwischen den Testtrials der Experimental- und der Kontrollgruppe sollte zeigen, wie die Belohnung das Blickverhalten beeinflusst. Sollte die Blickzeit für das Verfolgungsereignis in den Testtrials kürzer ausfallen und sollte es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Blickzeiten zwischen beiden Gruppen geben, so würde dies dahingehend interpretiert, dass die Säuglinge keinen Zusammenhang zwischen dem Flimmern und dem Verfolgungsereignis hergestellt haben. In diesem Fall würden die Blickzeiten der Säuglinge eher die Salienz der Bewegung und des Flimmerns als die domänenspezifischen Entdeckungsprozesse widerspiegeln. Entsprechend erlaubt die Untersuchung einer Säuglingsstichprobe, den Beitrag domänenallgemeiner Mechanismen genauer zu identifizieren.

Das verwendete Versuchsdesign kommt den Aufgabenanforderungen der Entdeckungsaufgaben aus der Erwachsenenforschung näher, als die üblichen Versuchsparadigmen (Gergely et al., 1995; Rochat et al., 1997). Damit bietet sich auch die Möglichkeit, die Leistung der Erwachsenen und der Säuglinge direkt zu vergleichen. Es wurde zusätzlich eine Gruppe von erwachsenen Versuchspersonen mit demselben Versuchsdesign erhoben. Diese wurden aufgefordert, sich die Stimuli anzuschauen. Die Leistung der Erwachsenen kann in Bezug auf das Blickverhalten der Säuglinge als die obere Leistungsgrenze betrachtet werden. Die Ergebnisse der Erwachsenenengruppe helfen bei der Interpretation der Ergebnisse des Säuglingsversuchs.

Ähnlich wie die erste Studie bietet die Säuglingsstudie mehrere methodologische Neuerungen. Wie in der ersten Studie sollen diese Neuerungen klären, inwieweit das Blickverhalten domänenspezifische Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter

Bewegung widerspiegelt.

3.2 Methoden

3.2.1 Stichprobe

74 Säuglinge im Alter von 7 Monaten nahmen an der Studie teil (44 Jungs, Altersspanne 199 bis 244 Tage). Zusätzlich wurden 28 Erwachsene Versuchspersonen (4 männlich) unter Studierenden der Universität Heidelberg rekrutiert.

3.2.2 Stimulus

Die Stimuli wurden wie in der ersten Studie erzeugt. An dieser Stelle werden nur Stimulusmerkmale genannt hinsichtlich derer sich die Säuglingsstudie von der ersten Studie unterscheidet. In einer Hälfte der Trials wurden 6 Ringe und in der anderen Hälfte 8 Ringe gezeigt. Die Reihenfolge dieser zwei Trialtypen war zufällig. Die Ringe bewegten sich mit einer Geschwindigkeit von 9 Grad pro Sekunde. Die Ringe änderten die Bewegungsrichtung 5,4 Mal pro Sekunde.

3.2.3 Versuchsdesign

Jeder Säugling sah bis zu 20 Trials. Ein Trial dauerte bis zu 2 Minuten. Es wurden zwei Trialtypen unterschieden. Bei sog. Trainingstrials wurde eine Belohnung nach fünf konsekutiven Sakkaden zur Beute oder zum Jäger gezeigt (drei Sakkaden beim ersten Mal). In sog. Testtrials wurde keine Belohnung gezeigt. Die Belohnung in den Trainingstrials sah folgendermaßen aus: Beute und Jäger fingen an, violett zu flimmern (mit einer Frequenz von 1,875 Hz). Ein Trial wurde beendet entweder

- (a) nachdem die Versuchsperson zwölf konsekutive Sakkaden zur Beute/Jäger gemacht hatte,
- (b) nachdem die Versuchsperson sechs oder mehr konsekutive Sakkaden zur Beute/Jäger gemacht hatte und dann innerhalb der nächsten 2 Sekunden keine weitere Sakkade zum Beute/Jäger Paar erfolgten,
- (c) nachdem die Versuchsperson für mehr als 6 Sekunden ununterbrochen den Blick vom Bildschirm abgewendet hatte, oder

(d) nachdem die Trialdauer 2 Minuten erreicht hatte.

Bei a,b und d fing nachfolgend sogleich der nächste Trial an. Bei c wurde eine Spirale in der Bildschirmmitte gezeigt und ein Geräusch so lange abgespielt, bis der Säugling wieder zum Bildschirm schaute. Danach fing der nächste Trial an. Der Versuch endete entweder automatisch nach 6 Minuten Gesamtzeit, oder er wurde vorzeitig beendet wenn das Kind bzw. die Mutter abbrachen. Es wurden vier Säuglingsgruppen erhoben.

G1 entspricht der bisherigen Beschreibung.

G2 sah die Bewegung von Ringen mit 4 Richtungsänderungen pro Sekunde (anstatt von 5,4 in der G1).

G3 Die Ringe zeigten ebenfalls 4 Richtungsänderungen pro Sekunde, aber die Beute und der Jäger behielten einen Mindestabstand von 3 Grad bei. Dies wurde mit derselben Prozedur erreicht, die in Experiment 1 zur Erzeugung der Stimuli (ME) verwendet wurde.

G4 diente als Kontrollgruppe. G4 war identisch zu G1. Allerdings wurde keine Belohnung bei den Trainingstrials gezeigt.

Weitere vier Kontrollbedingungen wurden aus den bestehenden Daten erzeugt. Die Blickposition wurde mit einem anderen Stimulus gepaart, so dass die Blickbewegung nicht mit der Stimulusbewegung übereinstimmte. Diese Kontrollberechnung sollte Auskunft darüber liefern, wie sich das Verhalten der Säuglinge von einem zufälligem Verhalten unterscheidet. Weitere drei Kontrollgruppen wurden mit Erwachsenen erhoben. Diese entsprachen den Säuglingsgruppen G2, G3 und G4. Ähnlich wie bei den Säuglingsgruppen wurden drei zusätzliche Bedingungen mit randomisierten Stimuli aus den Erwachsenenendaten erzeugt.

3.2.4 Echtzeitberechnung der Fixationen

Der verwendete Tobii T60 Eyetracker lieferte die Blickposition auf dem Bildschirm für beide Augen jede 16,7 Millisekunden. Die Blickposition der beiden Augen wurde gemittelt. Aus den Rohdaten x_t ($t = 1, \dots, T$) wurden die gefilterten Daten y_t berechnet: $y_t = 0.4x_t + 0.6y_{t-1}$. Die Blickdaten wurden für die horizontale und vertikale Koordinatenachse getrennt gefiltert. Die Blickgeschwindigkeit wurde als die Entfernung zwei jeweils nachfolgender Datenpunkte berechnet. Als Fixation wird eine Gruppe

der nachfolgenden Datenpunkte bezeichnet deren Geschwindigkeit höher als 18 Grad pro Sekunde ist und deren Dauer mindestens 100 Millisekunden beträgt. Durch die Mittelung der Blickposition während der ersten 100 Millisekunden nach dem Fixationsanfang wurde der Sakkadenzielort berechnet. Falls der Abstand zwischen dem Sakkadenzielort und der Position der Beute oder des Jägers 187 Ms vor dem Fixationsanfang weniger als 3 Grad betrug, wurde diese Sakkade als Sakkade zur Beute/Jäger (BJ Sakkade) eingestuft. Die Verzögerung von 187 Ms sollte die Verzögerung zwischen der tatsächlichen Blickbewegung und dem Zeitpunkt zu dem die Fixation durch den Algorithmus identifiziert wurde kompensieren.

3.2.5 Ablauf

Das Kind wurde in einen Babystuhl vor den Bildschirm gesetzt. Der Abstand zum Bildschirm betrug 50-70 Zentimeter. Alle Angaben in Grad des Sichtwinkels beziehen sich auf einen Abstand von 50 Zentimetern. Der Eyetracker ist bei einem Tobii T60 Gerät in dem Bildschirm unterhalb der Bildfläche eingebaut und damit unsichtbar. Vor dem Versuch wurde der Eyetracker kalibriert. Zur Kalibrierung wurde eine rotierende und pulsierende Spirale an fünf Bildschirmorten gezeigt. Die Kalibrierung wurde wiederholt bis eine Genauigkeit von mindestens 2 Grad für alle fünf Orte erreicht wurde. Das Experiment wurde mit PsychoPy 1.75 und Tobii SDK 3.0 gesteuert.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Definition der Zustände

Es wurden fünf zeitlich exklusive Zustände unterschieden:

Z1 die Versuchsperson schaut nicht zum Bildschirm

Z2 die Versuchsperson schaut zum Bildschirm

Z3 die Versuchsperson schaut zur Beute oder zum Jäger

Z4 die Belohnung wird gezeigt (nur bei Trainingstrials)

Z5 die Belohnung sollte gezeigt werden aber es handelt es sich um einen Testtrial und sie wird nicht angezeigt

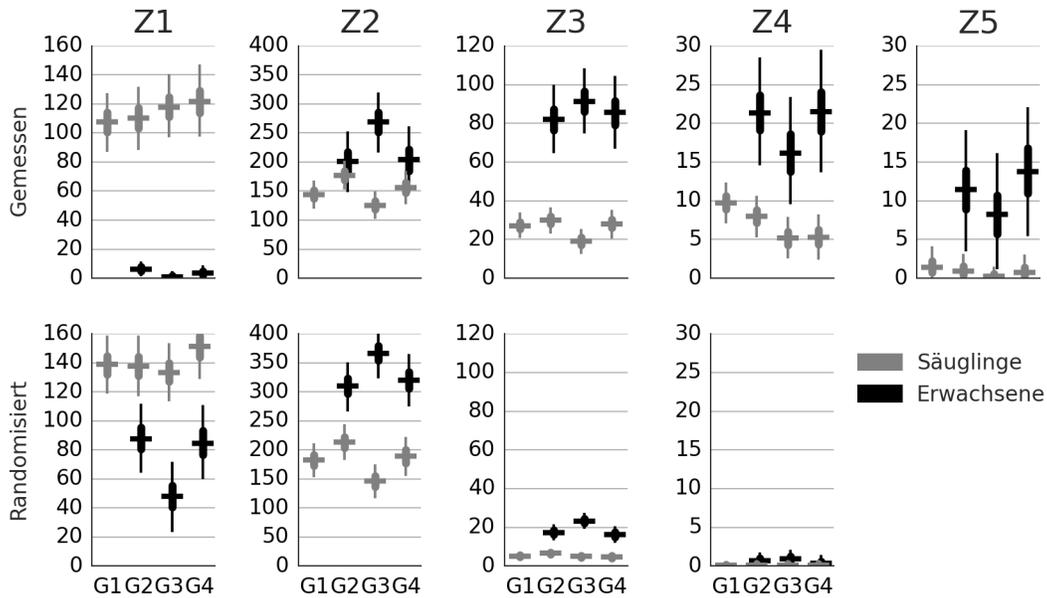


Abbildung 3.1: Gesamtdauer der Zustände. Ein Fehlerbalken zeigt den Medianwert (waagerechte Linie), den 50% Intervall (dicke senkrechte Linie) und den 95% Intervall (dünne senkrechte Linie). Die senkrechte Achse in jeder Zelle zeigt die erwartete Gesamtdauer in Sekunden. Die waagerechte Achse listet die vier Gruppen (drei bei Erwachsenen).

Bei Kontrollgruppe G4 wird während Z4 die Belohnung nicht gezeigt. Die Unterscheidung zwischen Z4 und Z5 wurde in der Analyse dennoch beibehalten, um einen guten Vergleich zu erzielen. Z4 und Z5 fangen jeweils mit der dritten bzw. der fünften BJ Sakkade an. Z3 beginnt mit der ersten BJ Sakkade. Z3, Z4 und Z5 enden gleichzeitig mit dem Trial oder 333 Millisekunden nach der letzten BJ Sakkade. Alle Zustände Z2 kürzer als 2 Sekunden und alle Z1 kürzer als 0.5 Sekunden wurden entfernt. Diese Zustände wurden jeweils in Z1 und Z2 umgewandelt und dann mit den Z1 beziehungsweise Z2 vor und nach dem Zustand zusammengefügt.

3.3.2 Gesamtdauer der Zustände

Als erstes wurde die Gesamtdauer der Zustände ausgewertet. Die Gesamtdauer $x_{z,v}$ ist die summierte Dauer der Zustände des jeweiligen Zustandstyp z für die Versuchsperson v . Die erwartete Gesamtdauer über alle Versuchspersonen μ_z wurde mit einem Gauß-Modell geschätzt: $x_{z,v} \sim \mathcal{N}(\mu_z, \sigma_e)$. Die Werte $x_{z,v} = 0$ wurden als zensiert behandelt (mit Null als den oberen Grenzwert, siehe Gelman & Hill, 2006, Kapitel 18.5).

Das Model wurde mit STAN 2.2.0 (<http://mc-stan.org>) geschätzt. Die Schätzung wurde getrennt für jede Gruppe durchgeführt und die erwartete Gesamtdauer wird in Abbildung 3.1 gezeigt.

Bei betrachtung der oberen Reihe in Abbildung 3.1 zeigt sich, dass die Erwachsenen während des ganzen Versuchs zum Bildschirm (Z1) schauten. Die Säuglinge wandten dagegen den Blick bis zu zwei Minuten vom Bildschirm ab. Folglich sind die restlichen Zustände Z2 bis Z5 bei den Säuglingen kürzer als bei den Erwachsenen. Die Säuglinge schauten ca. ein fünftel der Zeit, in der sie auf dem Bildschirm schauten, zur Verfolgung ($(\mu_{Z3} + \mu_{Z4} + \mu_{Z5}) / (\mu_{Z2} + \mu_{Z3} + \mu_{Z4} + \mu_{Z5})$, siehe Tabelle 3.1). Die Erwachsenen schauten ein drittel dieser Zeit zur Verfolgung. Der Vergleich von Z4 und Z5 zeigt, dass die Säuglinge 90% der Zeit auf die Trainingstrials schauten und nur 10% auf die Testtrials. ($\mu_{Z4} / (\mu_{Z4} + \mu_{Z5})$). Bei den Erwachsenen machten die Trainingstrials nur zwei drittel der Z4 und Z5 aus. Allerdings bekamen die Säuglinge bei kürzeren Blickzeiten zum Bildschirm auch weniger Gelegenheit, Testtrials zu beobachten (da diese erst nach drei Trainingstrials regelmäßig gezeigt wurden). Die Z4/Z5 Unterschiede zwischen den Säuglingen und Erwachsenen können daher auch durch die Unterschiede bezüglich Z1 erklärt werden. Die letztere Interpretation ist sehr wahrscheinlich, da die Z4 und Z5 bei G4 perzeptuell identisch waren. Bei G4 sind die Z4 dennoch länger als die Z5. Das ist sowohl der Fall bei den Erwachsenen wie bei den Säuglingen. Im nächsten Absatz wird die Mediandauer der Zustände untersucht. Diese ist unabhängig von der Präsentationshäufigkeit der Testtrials und kann damit besser zur Klärung beitragen, ob es Unterschiede zwischen den Säuglingen und den Erwachsenen gibt.

Die zweite Reihe in Abbildung 3.1 zeigt, dass die Erwachsenen sowie die Säuglinge

		G1	G2	G3	G4
F1	S	16,4 [12,2;21,0]	18,1 [14,8;21,4]	21,0 [17,4;25,1]	18,0 [14,3;22,2]
F1	E	-	30,1 [25,3;35,8]	36,4 [30,0;44,2]	37,3 [30,5;45,9]
F2	S	94,7 [76,7;99,8]	89,9 [71,3;99,5]	87,4 [69,9;99,0]	87,2 [60,3;99,4]
F2	E	-	66,4 [45,3;92,3]	65,0 [49,2;85,7]	60,8 [45,0;80,4]

Tabelle 3.1: Anteile der Zustände in Prozent. Jede Zelle zeigt den Median sowie den 95% Intervall in den Klammern. Die Werte wurden mit der Formel in der ersten Spalte berechnet. F1 ist $100 \cdot (\mu_{Z3} + \mu_{Z4} + \mu_{Z5}) / (\mu_{Z2} + \mu_{Z3} + \mu_{Z4} + \mu_{Z5})$. F2 ist $100 \cdot \mu_{Z4} / (\mu_{Z4} + \mu_{Z5})$. S steht für Säuglinge und E für Erwachsene.

überzufällig häufig auf die Verfolgung schauten. Die Gesamtdauer der Z3 und Z4 ist jeweils länger in der ersten Reihe als in der zweiten Reihe.

Die Unterschiede zwischen den Gruppen G1, G2, G3 fallen im Vergleich zu den anderen Unterschieden die hier betrachtet wurden, nur gering aus. Die Unterschiede in der Stimulusgestaltung scheinen somit eine eher geringe Rolle zu spielen. Es ist zu beachten, dass die geschätzte Gesamtdauer bei Z4 und Z5 ein breites Intervall aufweist. Dies ist eine Folge der kleineren Stichprobengröße bei diesen Zuständen.

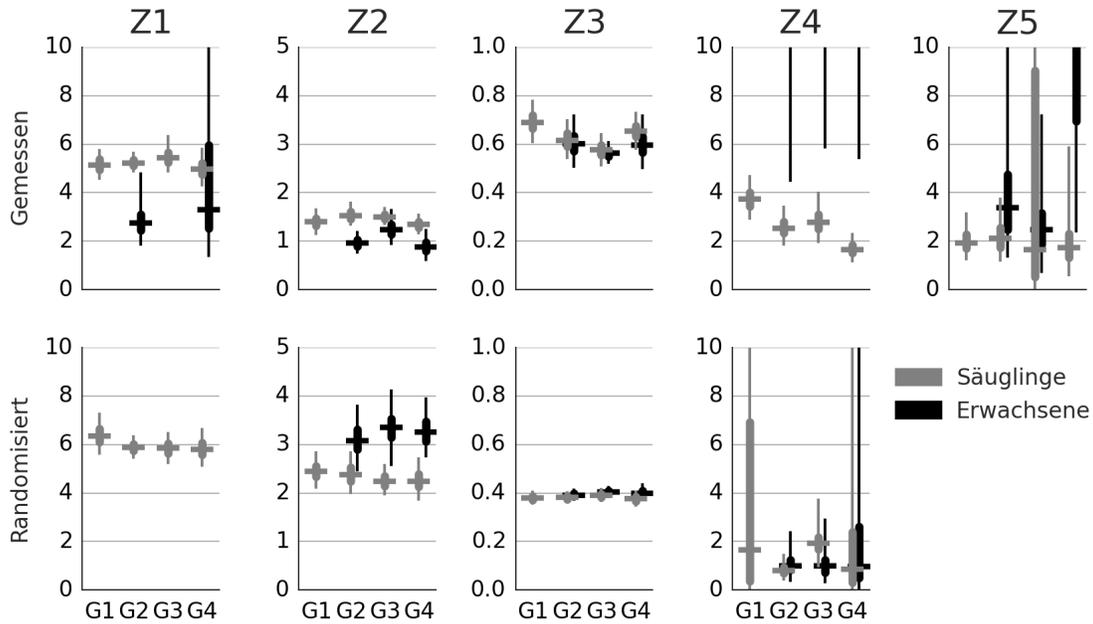


Abbildung 3.2: Mediandauer der Zustände in Sekunden. Jeder Fehlerbalken zeigt den Medianwert (waagerechte Linie), das 50% Intervall (dicke senkrechte Linie) sowie das 95% Intervall (dünne senkrechte Linie). Die vertikale Achse in jeder Zelle zeigt die erwartete Dauer in Sekunden. Die horizontale Achse listet die vier Gruppen (drei bei Erwachsenen).

3.3.3 Mediandauer der Zustände

Die Gesamtdauer ist schwer zu interpretieren und zu vergleichen, da die Gesamtdauer eines Zustands von der Dauer des Experiments, sowie von der Gesamtdauer der restlichen Zustände abhängt. Nachfolgend wurde die Mediandauer der Zustände geschätzt. Sei $y_{i,z,v}$ die Dauer des i -ten Zustand von Typ z bei Versuchsperson v . Bei

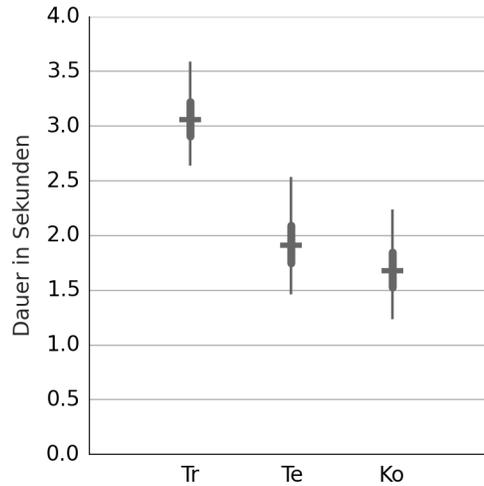
den Säuglingen wurde folgendes hierarchische Modell geschätzt:

$$\log(y_{i,z,v}) \sim \mathcal{N}(\nu_{e,v}, \rho_z)$$

$$\nu_{z,v} \sim \mathcal{N}(\gamma_z, \delta_z)$$

Als zensiert wurden Werte behandelt, bei denen der Zustand nicht durch die Entscheidung der Versuchsperson, sondern durch die Versuchssteuerung unterbrochen wurde (und die Versuchsperson evtl. viel länger hinschauen würde). Das sind in der Regel alle Zustände, bei denen der Trial zu Ende ging. Es betrifft zusätzlich noch die Z3 Zustände die durch Z4 oder Z5 beendet wurden.

Bei den Erwachsenen erwies sich die Schätzung der Mediandauer der Z1, Z4 und



1

Abbildung 3.3: Mediandauer der Trainingstrials (Z4 der G1, G2 und G3), der Testrials (Z5 der G1, G2 und G3) und der Kontrollrials (Z4 und Z5 der G4).

Z5 als schwierig, da viele Versuchspersonen keine Z1 zeigten. Zusätzlich wurden fast alle Z4 und Z5 nicht durch die Versuchsperson beendet. Das Modell wurde erweitert, so dass das Modell flexibler wurde und die Information zwischen den Parametern unterschiedlicher Versuchspersonen geteilt wurde:

$$\log(y_{i,z,v}) \sim \mathcal{N}(\nu_{z,v}, |\rho_{z,v}|)$$

$$\nu_{z,v} \sim \mathcal{N}(\gamma_z, |\delta_z|)$$

$$\rho_{z,v} \sim \text{Cauchy}(0, 5)$$

$$\delta_z \sim \text{Cauchy}(0, 5)$$

Die geschätzte Mediandauer $\exp(\gamma_z)$ wird in Abbildung 3.2 gezeigt. Die Werte, die nicht verlässlich geschätzt werden konnten, sind meistens hoch und erscheinen nicht in der Abbildung. Der interessanteste Vergleich betrifft Z4 und Z5. Die Säuglinge schauten 3 bis 4 Sekunden wenn die Verfolgungsbewegung flimmerte, aber nur 2 Sekunden, wenn die Verfolgung nicht flimmerte. Die Gruppe G4, bei welcher die Zustände Z4 und Z5 visuell identisch waren, schaute ca. 2 Sekunden auf die Verfolgung. Das Flimmern scheint die Wahrscheinlichkeit, dass die Säuglinge auf die Verfolgung in den Testtrials schauen, nicht erhöht zu haben. Um den Vergleich zwischen den Trials zu präzisieren, wurde ein Populationswert jeweils für Z4 der Gruppen G1, G2 und G3 (Trainingtrials, Tr), für Z5 der Gruppen G1, G2 und G3 (Testtrials, Te) und für Z4 und Z5 der Gruppe G4 (Kontrolltrials) geschätzt. Die Ergebnisse dieser Schätzung werden in Abbildung 3.3 gezeigt. Die Trainingtrials waren um eine Sekunde (ca. 2 Sakkaden) länger als die Testtrials und die Kontrolltrials. Die Testtrials waren etwas länger als die Kontrolltrials, die Schätzintervalle überlappen aber weitgehend.

Wie bereits dargelegt, war die Schätzung bei Erwachsenen ungenau, da die meisten Zustände nicht von der Versuchsperson beendet wurden. Es ist daher zwar bekannt, dass der Zustand Z4 länger als 6 Sekunden war, die genaue Mediandauer ist aber nicht bekannt. Dasselbe gilt für Gruppe G4 (sowie für Z4 und als auch für Z5).

Die untere Reihe in Abbildung 3.2 zeigt, dass die Dauer der Z4 (und Z5) bei zufälligem Blickverhalten 1 bis 2 Sekunden betrug. Die Dauer des Z4 in der oberen Reihe ist deutlich höher.

3.3.4 Übergänge zwischen den Zuständen

Vollständigkeitshalber wurden auch die Wahrscheinlichkeiten für die Übergänge zwischen den Zuständen geschätzt. Die Mediandauer aus dem vorherigem Absatz und die Übergangswahrscheinlichkeiten in diesem Absatz definieren ein kontinuierliches Markovmodell, der das Blickverhalten der Säuglinge vollständig beschreibt. Es wurden fünf Zustände definiert. Es sind jedoch nicht Übergänge zwischen allen Zustandspaaen möglich. Es wurden nur Übergänge modelliert, die durch die Entscheidung der Versuchsperson entstanden sind. So ist die Wahrscheinlichkeit, dass Z3 durch Z4 oder Z5 gefolgt wird nicht weiter relevant. Diese Wahrscheinlichkeit wird durch das Versuchsdesign bestimmt. Die gültigen Übergänge werden in Abbildung 3.4 dargestellt. Da zu wenige Daten vorliegen, um die Übergangswahrscheinlichkeiten für

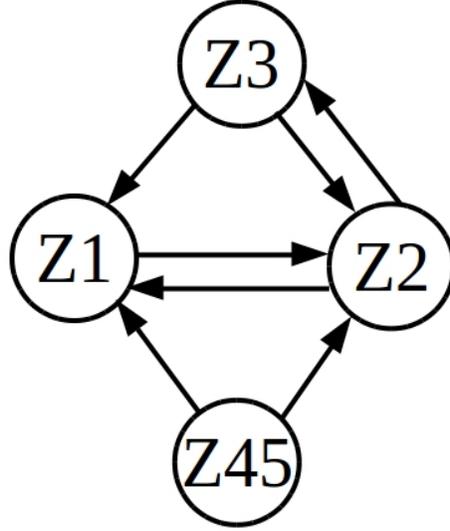


Abbildung 3.4: Zustandsübergangsdiagramm. Knoten zeigen die Zustände. Pfeile zeigen die erlaubten Übergänge.

Z4 und Z5 getrennt zu schätzen, wurden diese Zustände als Z45 zusammengefasst. Wie die Abbildung 3.4 zeigt, wird Z1 immer von Z2 gefolgt. Bei Z2, Z3 und Z4 gibt es jeweils zwei Ausgänge, einer davon endet in Z1.

Sei $p_{z,g}$ die Übergangswahrscheinlichkeit für Eingang Z1 aus dem Ausgangszustand $z \in \{Z2, Z3, Z4\}$ der Gruppe g . Die Wahrscheinlichkeit für den anderen Eingang ist gegeben durch $1 - p_{z,g}$. $p_{z,g}$ wurde mit Hilfe des folgenden Modells geschätzt:

$$\begin{aligned}
 u_{z,v,i} &\sim \text{Bernoulli}(q_{z,v}) \\
 q_{z,v} &\leftarrow 1/(1 + \exp(-\theta_{z,v})) \\
 \theta_{z,v} &\sim \mathcal{N}(\phi_{g(v)}, \Sigma) \\
 p_{z,g} &\leftarrow 1/(1 + \exp(-\phi_{z,g}))
 \end{aligned}$$

$u_{z,v,i}$ stellt den beobachteten Übergang für Versuchsperson v und Ausgang z dar. $u_{z,v,i} = 1$ falls z in Z1 übergeht und $u_{z,v,i} = 0$ sonst. ϕ_g ist ein Vektor mit drei Elementen $\phi_{z,g}$. Σ ist eine 3×3 Matrix mit Hilfe derer die paarweisen Korrelationen zwischen den Zuständen z in $\theta_{z,v}$ gemessen werden. Abbildung 3.5 zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass Zustand Z2, Z3 oder Z45 von Z1 gefolgt wird. Wie erwartet ist die Wahrscheinlichkeit für Z1 höher bei den Säuglingen, die öfter ihren Blick vom Bildschirm abwenden. Bei Erwachsenen ist die Wahrscheinlichkeit gleich Null.

Die Übergangswahrscheinlichkeiten des Z45 können bei Erwachsenen nicht verlässlich geschätzt werden, da nur sehr wenige Z45 durch Erwachsene beendet wurden. Ob-

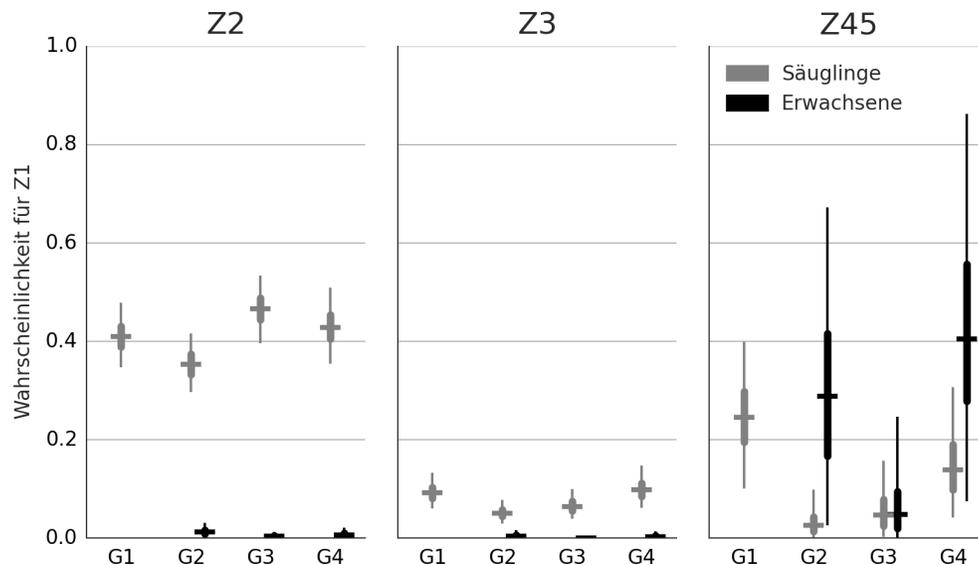


Abbildung 3.5: Wahrscheinlichkeit, dass der Zustand Z2, Z3 oder Z45 von Z1 gefolgt wird. Abbildung 3.4 zeigt was passiert, wenn das Ereignis nicht von Z1 gefolgt wird. Jeder Fehlerbalken zeigt den Medianwert (waagerechte Linie), das 50% Intervall (dicke senkrechte Linie) und das 95% Intervall (dünne senkrechte Linie). Die vertikale Achse in jeder Zelle zeigt die erwartete Dauer in Sekunden. Die horizontale Achse listet die vier Gruppen (drei bei Erwachsenen).

wohl sich der zu Z1 alternative Eingang für die drei Ausgänge unterscheidet, scheinen die Wahrscheinlichkeiten für alle Ausgänge durch einen gemeinsamen Faktor geprägt zu sein. Dieser Faktor bestimmt die Wahrscheinlichkeit, den Blick von Bildschirm abzuwenden. Die Vermutung wird durch die Korrelationswerte in der Tabelle 3.2 bestätigt. Die Wahrscheinlichkeit für Z1 korreliert positiv über alle Ausgänge. Eine Versuchsperson, die nach Z2 häufig vom Bildschirm wegschaut, schaut auch nach Z3 und Z45 häufig weg vom Bildschirm.

	Z2:Z3	Z2:Z4	Z3:Z4
Säuglinge	0,48 [0,20;0,84]	0,51 [0,40;0,76]	0,58 [0,12;0,65]
Erwachsene	0,43 [0,24;0,83]	0,69 [0,61;0,93]	0,44 [0,27;0,66]

Tabelle 3.2: Korrelation zwischen den Versuchspersonwerten der Übergangswahrscheinlichkeiten. Jede Zelle zeigt den Median sowie das 95% Intervall in den Klammern.

3.4 Diskussion

3.4.1 Verfolgung mit und ohne Flimmern

In der zweiten Studie wurde untersucht, in welchem Maße die Säuglinge domänenallgemeine und domänenspezifische Mechanismen für die Entdeckung der Verfolgungsbewegung verwenden. In ersterem Fall wäre zu erwarten, dass die Säuglinge nur dann länger auf die Verfolgung schauen, wenn die beiden Akteure flimmern. Bei den Gruppen G1, G2 und G3 wäre eine längere Mediandauer des Zustands Z4 zu erwarten, als bei der Kontrollgruppe G4. Ebenfalls sollte die Mediandauer des Z4 der Gruppen G1, G2 und G3 höher liegen als die Mediandauer des Z5, da bei Z5 kein Flimmern gezeigt wurde. Falls die Säuglinge die Verfolgung als eigenständige Kategorie repräsentieren und gelernt haben, dass die Verfolgung mit einem Flimmern einhergeht, sollten sie auch in den Testtrials das Flimmern erwarten und länger auf das Flimmern schauen. In diesem Fall wäre eine längere Mediandauer des Z4 sowie des Z5 bei den Gruppen G1, G2 und G3 zu erwarten. Die Ergebnisse in Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 unterstützen die domänenallgemeine Erklärung für das Blickverhalten der Säuglinge. Für die obige Schlussfolgerung ist es kritisch, ob die Säuglinge gelernt haben, dass die Verfolgung und das Flimmern zusammen erscheinen. Falls die Säuglinge diesen Zusammenhang nicht enkodiert haben, dann werden sie auch nicht auf die nichtflimmernde Verfolgung achten. Haben Säuglinge den Zusammenhang enkodiert? Zunächst ist anzumerken, dass die Säuglinge länger auf die flimmernde Verfolgung als auf die nicht flimmernde Verfolgung geschaut haben. Die Auswahl der Belohnung war damit erfolgreich und die Säuglinge waren motiviert, auf die Verfolgung zu schauen. Weitere Informationen geben in diesem Zusammenhang auch die Daten der Erwachsenenstichprobe. Falls die Erwachsenen den Zusammenhang zwischen dem Flimmern und der Verfolgungsbewegung nicht gelernt hätten, dann läge die Vermutung nahe, dass die Lernaufgabe zu schwierig gewesen sein könnte. Wie Abbildung 3.2 zeigt, ist bei den Erwachsenengruppen G2 und G3 der Zustand Z5 kürzer als Z4. Die Erwachsenen hatten kein Problem damit, die Verfolgungsbewegung zu erkennen (Gao et al., 2009), dennoch scheinen sie den Zusammenhang nicht gelernt zu haben. Allerdings wie die Dauer der Z4 und Z5 der Gruppe G4 zeigt ist die Interpretation der Erwachsenenendaten komplexer. Die flimmernde Verfolgungsbewegung war für die Erwachsenen nicht salienter als die nichtflimmernde Verfolgungsbewegung. Wie Abbildung 3.2 zeigt, erzielen die Erwachsenen der G4 bereits die maximal mögliche Mediandauer. Die Mediandauer der Z4 der Erwachsenengruppen G2 und G3 kann damit nicht höher

liegen. Diese Deckeneffekte erklären aber nicht, weshalb die Z5 dieser Erwachsenen-
gruppen deutlich kurzer sind. Die Erwachsenen aus Gruppe G2 und G3 wurden nach
dem Versuch gefragt, wann das Flimmern vorgekommen sei. Bis auf eine Versuchsperson
hat keine weitere Versuchsperson erkannt, dass sie die Stimuluspräsentation durch
das eigene Blickverhalten beeinflussen konnte. Zwar wussten die Versuchspersonen,
dass ihre Blickbewegung aufgenommen wird, sie erwarteten jedoch nicht, dass diese
Daten zeitgleich ausgewertet würden. Die meisten Versuchspersonen nahmen an, dass
das Flimmern zufällig aufträte. Es ist plausibel anzunehmen, dass die Erwachsenen-
gruppen G2 und G3 ihre Aufmerksamkeit breit verteilten. Sie zeigten viele explorative
Sakkaden und verfolgten die Stimuli nur für kurze Zeit. Eine solche Suchstrategie ist
vorteilhaft wenn die Versuchspersonen nach einem Merkmal suchen das zufällig, eher
selten und nur für kurze Zeit erscheint. Diese Interpretation wird durch Ergebnisse
zur Gesamtdauer der Zustände in Abbildung 3.1 bekräftigt. Die Gesamtdauer des Z5
der G4 ist nicht länger als Z5 der Gruppen G3 und G2. Die kürzere Mediandauer des
Z5 wird also durch einen höhere Häufigkeit kompensiert.

Die Erwachsenenendaten sind damit nicht direkt mit den Daten der Säuglinge vergleich-
bar. Die Erwachsenen Versuchspersonen schienen deutlich Vorwissen in den Versuch
mit einzubringen. Sie erwarteten nicht, dass die Stimuli durch das eigene Blickver-
haltens beeinflussbar sind. Die Säuglinge dagegen scheinen die Untersuchung ohne
spezifische Erwartungen bezüglich des Ablaufs absolviert zu haben. Entsprechend fiel
es ihnen leichter, den Zusammenhang zwischen dem Flimmern und der Verfolgungs-
bewegung zu lernen.

Die Frage, ob die Kontingenz zwischen der Verfolgungsbewegung und der Belohnung
ausreichend war, um die Säuglinge zu motivieren nach der Verfolgung zu suchen, kann
an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Hierzu könnte beispielsweise eine höhere
Anzahl an Trainingstrials präsentiert werden. Es wäre auch denkbar, die Zeit von
der ersten BJ Sakkade bis zum Anfang des Flimmerns kürzer zu gestalten. Solche
Maßnahmen bringen jedoch auch immer Nachteile mit sich. Die Erhebungszeit bei
Säuglingsversuchen ist stark begrenzt. Eine hohe Anzahl an Trainingstrials führt bei
konstanter Erhebungszeit zu einer kleineren Anzahl an Testtrials. Die Anzahl der
Testtrials in den Säuglingsstudien war bereits im vorliegenden Fall sehr klein. Nur 38
von 74 Versuchspersonen hielten bis zum ersten Testtrial durch. Eine Folge der kleinen
Stichprobe sind die breiten Perzentilintervalle des Z5 bei den Säuglingsgruppen G3
und G4 in Abbildung 3.2.

Eine Abkürzung des Zeitintervalls zwischen der ersten BJ Sakkade und der Belohnung

kann dazu führen, dass die Belohnung zufällig ausgelöst wird. Damit wird dann nicht eine systematische Suche nach der Verfolgung belohnt. Bei kurzem Zeitintervall kann eine zufällige aber dafür breite Suche erfolgreich sein. Es wurde versucht, ein solches Suchverhalten zu vermeiden. Damit scheint das in der hier durchgeführten Studie eingesetzte Versuchsdesign die bestmöglichen Bedingungen zu bieten, um domänenspezifische Leistungen bei einer Säuglingsstichprobe aufzudecken.

3.4.2 Einfluss der Bewegungsmerkmale

Bei den Gruppen G1, G2 und G3 wurden die Stimulusmerkmale variiert. Die Zustände Z3 und Z4 der Säuglingsgruppe G1 sind länger als Z3 und Z4 der Gruppen G2, und die Zustände der Gruppen G2 sind wiederum länger als die Zustände der Gruppe G3. Dieses Ergebnismuster ist in Abbildung 3.2 sowie in Abbildung 3.1 zu beobachten. Die Unterschiede zwischen den Gruppen sind klein und die Schätzwerte sind ungenau. Die Unterschiede können damit auch durch Messfehler erklärt werden. Bei den übrigen Zuständen Z1, Z2 und Z5 zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Befunde können damit nicht belegen, dass Akteure mit einem Mindestabstand oder mit häufigeren Bewegungsänderungen länger oder kürzer fokussiert werden. Es ist eher wahrscheinlich, dass die Stimulusmerkmale das Blickverhalten der Säuglinge nur geringfügig beeinflussten. Eine Überlegung für künftige Forschung wäre es, die Unterschiede zwischen den Stimuli hinsichtlich der Stimulusmerkmale extremer zu gestalten. Damit würden die Unterschiede im Blickverhalten größer ausfallen und könnten besser entdeckt werden. Es ist jedoch unmöglich, den Abstand der Akteure und die Häufigkeit der Bewegungsänderungen unabhängig voneinander zu variieren. Zum Beispiel kann keine Verfolgung mit minimalem Abstand von 3 Grad und mit 5,4 Änderungen pro Sekunde erstellt werden. Ein großer Abstand kann mit Akteuren, die schnell ihre Bewegungsrichtung ändern nicht erreicht werden. Zusätzlich beeinflusst ein größerer Abstand auch die Winkelverteilung der Bewegungsänderungen. Diese Korrelation ist stärker bei einem größeren Abstand. Es gibt also nur eingeschränkte Möglichkeiten für einen alternativen Stimululentwurf. In künftigen Studien könnte versucht werden, andere Merkmale der Verfolgung wie etwa die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder die Zielgerichtetheit mit dem in dieser Säuglingsstudie verwendeten Versuchsdesign zu untersuchen. Es ist möglich, dass diese Merkmale einen größeren Einfluss auf das Blickverhalten haben, als der

Abstand oder die Häufigkeit der Bewegungsänderungen und dass dieser Einfluss dann besser experimentell nachgewiesen werden kann.

3.4.3 Vergleich zum zufälligen Blickverhalten

Der Vergleich zwischen den zwei Reihen in Abbildung 3.1 zeigt, dass die Erwachsenen ebenso wie die Säuglinge die Verfolgung überzufällig lange fokussieren. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Säuglinge die Verfolgungsbewegung beachten und mit dem Blick verfolgen. Die Säuglinge bevorzugen die Verfolgung vor den zufällig ausgewählten Ausschnitten. Die zufälligen Schätzwerte wurden durch die zufällige Paarung der Blickdaten der Versuchspersonen mit einem anderen Stimulus erzeugt. Das zufällige Blickverhalten fokussiert nicht auf die Ringe. Möglicherweise wird ein Distraktor gleich stark fokussiert wie die Beute oder der Jäger. Letzterer Vergleich scheint interessant, da dieser über die relative Salienz der Verfolgungsbewegung Auskunft gibt. Dieser Vergleich wurde auch von Rochat et al. (1997) untersucht. Die Dauer der Blickverfolgung bei den Distraktoren ließe sich ähnlich messen wie bei der Verfolgung. Alternativ könnten getrennte Experimente durchgeführt werden, in welchen das Schauen zu einem oder zu zwei Distraktoren belohnt wird. Allerdings ist die Entfernung zwischen der Beute und dem Jäger in der Regel kleiner als die Entfernung zwischen zwei zufällig ausgewählten Distraktoren. Das Sakkadenziel der BJ Sakkaden ist höchstens 3 Grad von der Beute oder vom Jäger entfernt. Bei dem Verfolgungspaar überschneiden sich damit die 3-Grad Flächen der Akteure. Bei zwei Distraktoren kommt eine solche Überschneidung selten vor. Damit ist die 3-Grad Fläche der Distraktoren größer. Somit ist es wahrscheinlicher, dass eine zufällige Blickbewegung die Distraktoren verfolgen wird. Der Vergleich zwischen der Blickverfolgung der Distraktoren und der Blickverfolgung des Verfolgungspaares wäre damit auch nicht eindeutig interpretierbar. In künftigen Studien mit dem Ziel, dieser Frage genauer nachzugehen, sollten statt zufälliger Distraktoren eine Kontrollbewegung einsetzen, bei der der Abstand zwischen den Akteuren dem Abstand während der Verfolgung entspricht.

Kapitel 4

Allgemeine Diskussion

Es sollen nun die zentralen Fragen der beiden hier dargestellten Studien in der Gesamtschau diskutiert werden. Insbesondere steht die Frage der Domänenspezifität der Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung im Zentrum der Diskussion. Es soll evaluiert werden, inwieweit die vorgestellten Studien zur Klärung dieser Frage beitragen, in welcher Hinsicht diese Studien die gesetzten Ziele nicht erreichen konnten, sowie Ansatzpunkte für künftige Studien aufgezeigt werden. Zusätzlich soll auf die methodologische sowie die anwendungsbezogene Bedeutung dieser Arbeit eingegangen werden.

4.1 Blickverfolgung und Aufmerksamkeit

Als eines der Probleme früherer Forschung wurde genannt, dass der Einfluss domänenallgemeiner Prozesse durch experimentelle Kontrolle nicht ausgeschaltet werden kann. Zur Lösung wurden domänenallgemeine Faktoren zusammen mit domänenspezifischen Faktoren untersucht. Insbesondere wurde versucht, mittels Eyetracking die Rolle der Blickbewegung und der Aufmerksamkeit bei der Entdeckung von Verfolgungsereignissen näher zu bestimmen. In der ersten Studie wurden zwei unterschiedliche Strategien der Blickverfolgung identifiziert. Diese Strategien wurden auch zusammen eingesetzt und ergeben damit ein ähnliches Verfolgungsverhalten wie in Fehd und Seiffert (2008) und Fehd und Seiffert (2010) berichtet wurde. In den Studien von Fehd und Kollegen versuchten die Versuchspersonen, eine Gruppe aus mehreren bewegten Objekten im Blick zu behalten. Die Versuchspersonen wechselten zwischen zwei Phasen. Entweder richteten sie den Blick zum Zentrum der Gruppe, oder sie fokussierten eines der Objekte. Es fällt allerdings schwer zu beurteilen, ob

der im ersten Experiment in der vorliegenden Arbeit beobachtete Blickwechsel von der Beute zum Jäger während der glatten Augenbewegung, eine aufgabenspezifische Strategie darstellt, oder, ob dies der Verfolgungsstrategie in Fehd und Seiffert (2010) entspricht. Der Wechsel wird durch die verlangsamte glatte Augenbewegung erzeugt. Das typische Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit der Blickbewegung und der Geschwindigkeit des Zieles ist 0,9 bis 1 (Meyer, Lasker & Robinson, 1985). Bei der glatten Augenbewegung in der ersten Studie war das Verhältnis 0,7 und damit deutlich kleiner. Es wurde allerdings berichtet, dass die Versuchspersonen dieses Verhältnis unter Umständen auch unter 0,9 senken können (Steinman, Skavenski & Sansbury, 1969). In den üblichen Untersuchungen der glatten Augenbewegungen wird i.d.R. nur die Blickverfolgung einzelner Objekte getestet. Die Ergebnisse lassen sich daher schwer vergleichen. Fehd und Kollegen machen leider keine Aussagen über die Geschwindigkeit der glatten Augenbewegung. Es ist möglich, dass die glatte Augenbewegung deutlich langsamer ist als die einzelnen Akteure, wenn diese als Gruppe verfolgt werden, da sich das Zentrum der Gruppe langsamer bewegt als die einzelnen Objekte. Auf der anderen Seite ist der Mittelpunkt zwischen der Beute und dem Jäger nicht deutlich langsamer als die zwei Akteure, da sich beide in derselben Richtung bewegen. Zusätzlich zeigen die Muster bei glatten Augenbewegung eher einen Akteurwechsel als eine Mittelpunktverfolgung. Es ist daher zu vermuten, dass die verlangsamte glatte Augenbewegung eine aufgabenspezifische Blickverfolgungsstrategie darstellt. Dennoch ist denkbar, dass eine kleinere Anzahl der glatten Augenbewegungen den Mittelpunkt verfolgt. Diese Möglichkeit sollte durch künftige Forschung geprüft werden.

Die Musteranalysen, zusammen mit der Auswertung der Salienz der Sakkadenziele bieten ausreichend Ergebnisse für eine Diskussion der Rolle der Aufmerksamkeit. Bei explorativen Sakkaden folgt der Blick einer Verschiebung der Aufmerksamkeit (Hoffman & Subramaniam, 1995). Die Ziele der explorativen Sakkaden entsprechen weitgehend den Vorhersagen des Salienzmodells von Itti und Koch (2000). Zur Aufmerksamkeitsverteilung während der glatten Augenbewegungen ist den Ergebnissen wenig Information zu entnehmen. Heinen, Jin und Watamaniuk (2011) zeigten, dass der Aufmerksamkeitsfokus während der glatten Augenbewegung nicht unbedingt mit dem Blickpunkt übereinstimmt. Watamaniuk und Heinen (2014) zeigten weiterhin, dass die Aufmerksamkeitsverteilung während der glatten Augenbewegung breit und flexibel ist. Meyerhoff et al. (2014b) argumentierten anhand ihrer Ergebnisse, dass die Versuchspersonen während der Verfolgungssuche die einzelnen Akteure und nicht

Paare oder Gruppen von Akteuren fokussieren. Da der Aufmerksamkeitsfokus bei den glatten Augenbewegungen nicht mit dem Blickpunkt übereinstimmt, stehen die Ergebnisse von Meyerhoff et al. (2014b) nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen die hier präsentiert wurden. Es ist möglich, dass die Aufmerksamkeit asymmetrisch verteilt ist, und dass die Versuchspersonen die Akteure gleichzeitig als Gruppe verfolgen.

Die Aufmerksamkeit während der Blickverfolgung kann über die verfolgten Akteure breit verteilt werden. Die *nicht* verfolgten Akteure im Hintergrund werden dagegen nicht betrachtet, beziehungsweise deren Merkmale können nur schwer erkannt werden (Khurana & Kowler, 1987; Schütz, Delipetkos, Braun, Kerzel & Gegenfurtner, 2007). Damit ergibt sich eine interessante Überlegung dazu, wie die Blickverfolgung die Entdeckung der Verfolgung beeinflussen kann. Die Eignung der Bewegung für die Blickverfolgung kann als ein Kriterium für die Beurteilung dessen dienen, ob es sich um eine Verfolgungsbewegung handelt. Die Akteure, die eine Verfolgungsbewegung zeigen, können besser mit dem Blick verfolgt werden und werden damit wahrscheinlich häufiger und länger verfolgt. Die sich zufällig bewegenden Akteure sind schwer zu verfolgen und werden weniger beachtet. Die Versuchspersonen müssen dabei die Bewegung während der Blickverfolgung gar nicht beurteilen. Wenn die Blickverfolgung erfolgreich zwei Akteure im Blick behält, dann entsprechen diese zwei Akteure wahrscheinlich der Beute und dem Jäger. Wie bereits in der Einleitung thematisiert wurde, bietet die Blickverfolgung eine domänenallgemeine Erklärung für die Entdeckung der Verfolgung. Die Ergebnisse der ersten Studie zeigen, dass die Blickverfolgung eine große Rolle bei der Entdeckung der Verfolgung spielt. An dieser Stelle soll daher auf diese domänenallgemeine Erklärung näher eingegangen werden. Die Blickverfolgung als Entdeckungskriterium beschreibt die Entdeckung der Verfolgung nicht vollständig. Zum Beispiel wäre eine Annäherung (Film 13) oder eine Beschleunigung des Jägers nicht unbedingt einfach zu verfolgen. Eine solche Bewegung wird aber trotzdem als Verfolgung erkannt (Frankenhuis et al., 2013). Andererseits gibt es auch Bewegungen, die einfach zu verfolgen sind, die aber keine Verfolgung darstellen. Ein Beispiel dafür wären zwei Akteure, die sich parallel nebeneinander bewegen. Solche Bewegungen werden nicht als Verfolgung erkannt (siehe aber Film 14). Die Blickverfolgung als Entdeckungskriterium kann dabei helfen, einen interessanten Aspekt der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung und Belebtheit zu erklären. Scholl und Gao (2013) haben darauf hingewiesen, dass Menschen Belebtheit oder zielgerichtete Bewegung „einfach sehen“. Menschen sehen dies mühelos, unaufgefordert

und automatisch. Gleichzeitig können Menschen nicht reflektieren, welche Merkmale sie für die erfolgreiche Entdeckung verwenden. Die Autoren werten diese Beobachtung als Evidenz für die Domänenspezifität der Mechanismen, die zur Entdeckung der Verfolgungsbewegung führen. Die Blickverfolgung des Verfolgungsereignisses ist allerdings ebenfalls mühelos und automatisch, und die schnellen Blickbewegungen können schlecht introspektiert werden. Die Hypothese der Blickverfolgung als Entdeckungskriterium kann damit die subjektive Wahrnehmung der zielgerichteten Bewegung erklären. Diese Erklärung kann überprüft werden, indem man die Blickbewegungen einschränkt und dann testet, ob die subjektive Mühelosigkeit der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung trotz solcher Einschränkung erhalten bleibt.

7 Monate alte Säuglinge können noch keine Blickverfolgung ausüben. Diese Fähigkeit entwickelt im Laufe des ersten Lebensjahres (Aslin, 1981; Pieh, Proudlock & Gottlob, 2012; Von Hofsten & Rosander, 1997). Im zweiten Versuch der vorliegenden Arbeit wurde entsprechend auch keine Blickverfolgung bei den Säuglingen beobachtet. Die Säuglinge verfolgen stattdessen die Bewegung mit einer Mischung aus kurzen Fixationen und kurzen Sakkaden. Interessanterweise wurden auch Entwicklungsunterschiede in den Blickzeitmaßen im Alter zwischen 6 und 12 Jahren festgestellt (Gergely et al., 1995; Rochat et al., 1997, 2004). Damit stellt sich die Frage, ob diese Änderungen nicht durch die Entwicklung der Blickverfolgung bedingt sind. Zur Klärung dieser Frage könnte mit einer Längsschnittstudie nachgegangen werden, welche die Entwicklung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung zwischen 6 und 12 Monaten in Abhängigkeit von der Entwicklung der Blickbewegung untersucht.

Weitere Beispiele für Leistungsunterschiede zwischen Gruppen von Versuchspersonen die durch Unterschiede in der Fähigkeit, Blickverfolgung auszuüben, erklärt werden können, zeigen sich bei Untersuchungen mit älteren Erwachsenen. Senioren zeigen eine geringere Genauigkeit bei der Blickverfolgung. Sie haben vor allem Schwierigkeiten, schnelle Bewegungen zu verfolgen (Zackon & Sharpe, 1987). Takarae, Minshew, Luna, Krisky und Sweeney (2004) haben weiterhin gezeigt, dass Autisten die Geschwindigkeit der Blickverfolgung schlechter an die Geschwindigkeit der Zielbewegung anpassen können als Nichtautisten. Es ist somit anzunehmen, dass sich Senioren und Autisten bezüglich der Wahrnehmung zielgerichteter oder belebter Objekte von (gesunden) Erwachsenen sowie untereinander unterscheiden. Die Untersuchungen dieser Teilpopulationen bieten damit auch eine Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung und den Blickbewegungen näher zu bestimmen.

4.2 Bayesianische Statistik

Abgesehen von den Musteranalysen wurde vor allem in der Säuglingsstudie Bayesianische Statistik (Gelman, Carlin, Stern & Rubin, 2014) zur Auswertung herangezogen. An dieser Stelle soll auf die Vorteile der Bayesianischen Auswertung hingewiesen werden. Die Bayesianische Statistik bietet eine größere Flexibilität bei der Modellierung des datenerzeugenden Prozesses. In dieser Studie wurden insbesondere log-lineare Modelle verwendet, um die Reaktionszeiten (erste Studie) und die Dauer der Ereignisse (zweite Studie) zu modellieren. Solche Daten würden üblicherweise mit einer Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet. ANOVA setzt lineare Haupteffekte und additive Interaktionen voraus. Loglineare Haupteffekte werden durch eine ANOVA als additive Interaktionen eingestuft, was zu falschen Interpretationen der Daten führen kann. Umgekehrt können über eine ANOVA keine multiplikativen Interaktionen erkannt werden. Ein anderer Aspekt, der die Flexibilität einer Bayesianischen Auswertung illustriert, ist die Verwendung hierarchischer Modelle (Gelman & Hill, 2006; Lee, 2011). Bei der Schätzung der Dauer der Zustände werden die Schätzwerte der Versuchspersonen (zum Beispiel $\nu_{z,v}$) anhand der Anzahl der Beobachtungen und anhand der Varianz gewichtet. Schätzwerte mit wenigen Beobachtungen und/oder hoher Variabilität der beobachteten Werte tragen in geringerem Maße zum Populationsschätzwert (γ_z) bei. Im Kontrast dazu, kann die übliche Analyse, bei der die Beobachtungen für jede Versuchsperson gemittelt und anschließend die Versuchspersonmittelwerte ausgewertet werden, zu einem verzerrten Schätzwert führen. Die Analyse der Versuchspersonmittelwerte setzt voraus, dass die Varianz der Beobachtungen, sowie die Anzahl der Beobachtungen für alle Versuchspersonen gleich ist. In den entwicklungspsychologischen Studien ist kaum gewährleistet, dass die Säuglinge oder Kinder eine gleiche Anzahl an Trials sehen. Hierarchische Modellierung bietet eine Lösung dieser Situation. Hierarchische Modellierung ermöglicht es zudem, Versuchspersonen mit wenigen Beobachtungen in die Analyse einzuschließen. Damit ist kein Ausschluss von Versuchspersonen wegen mangelnder Trialanzahl notwendig. Ein solcher Ausschluss basiert oft auf schwer begründbaren ad-hoc Kriterien und bietet dem Versuchsleiter eine Gelegenheit die Ergebnisdarstellung (bewusst oder unbewusst) zu verzerren. Aus diesen Gründen erweist sich die Bayesianische Statistik als gut geeignet, entsprechende Auswertungen (nicht nur) in der entwicklungspsycholo-

gischen Forschung zu unterstützen. Die Auswertung der zweiten Studie demonstriert die Vorteile der Bayesianischen Statistik.

4.3 Automatisierte Kameraüberwachung als Anwendungsgebiet

Die Frage nach der Domänenspezifität kognitiver Mechanismen ist nicht zuletzt auch deswegen von Bedeutung, weil eine entsprechende Antwort die Gestaltung unterschiedlicher Interventionen (klinische Interventionen oder Bildungsprogramme) stark beeinflussen kann. Auch wenn die Erforschung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung per se für solche Interventionen eine eher untergeordnete Rolle spielt ist dennoch ein Aspekt der vorliegenden Studien zu nennen, der auch für die Anwendungsforschung durchaus von Bedeutung sein kann. In der ersten Studie wurde ein methodologischer Ansatz verfolgt, der es erlaubt, die Beschreibung der Wahrnehmungsmechanismen algorithmisch umzusetzen. Eine solche Umsetzung ist für das Feld des Maschinellen Sehens interessant. An dieser Stelle wird ein Überblick über dieses Anwendungsgebiet geboten.

Entdeckung zielgerichteter Bewegung spielt eine große Rolle für die automatisierte und schnelle Erkennung von Diebstählen mittels Kameraüberwachung. Das Problem betrifft bewegliche Diebstahlziele (zum Beispiel die Reisenden auf dem Flughafen oder am Bahnhof) sowie stationäre Ziele (unbeaufsichtigtes Reisegepäck auf dem Flughafen, geparkte Lastwagen mit Frachtgut). Mit steigender Anzahl der Kameras wird es unpraktischer, eine rund um die Uhr Überwachung durch menschliches Personal durchzuführen. Eine Möglichkeit zur automatisierten Überwachung wird damit wünschenswert und unterschiedliche Systeme wurden bereits vorgeschlagen (Bouma et al., 2014; Burghouts et al., 2014). Eine automatisierte Überwachung birgt Schwierigkeiten, da die Überwachung oft Räume betrifft, in welchen sich viele Menschen aufhalten. Damit wird der Abgleich der Objekte zwischen den Kameras (die jeweils einen unterschiedlichen Sehwinkel bieten), sowie die Verfolgung der Objekte über die Zeit durch Verdeckungssituationen erschwert. Ein System zur automatisierten Erkennung erledigt üblicherweise drei Teilaufgaben: 1. Erkennung der Objekte und der Akteure. 2. Berechnung der Trajektorien, Aktivitäten und der Handlungen der Akteure aus welchen 3. eine Entscheidung getroffen wird, ob es sich zum bestimmten Zeitpunkt um einen Diebstahl handelt und ob ein Alarm ausgelöst werden soll. Der

dritte Schritt ist oft einfach und kann über die gängigen Klassifizierungsmethoden aus der Statistik erfolgen. Als deutlich schwieriger stellt sich Schritt zwei dar. Welche Merkmale sollen aus der Bewegung der Akteure extrahiert werden? Burghouts et al. (2014) berechneten neben einfacheren Merkmalen wie Geschwindigkeit oder Ausrichtung der Akteure auch komplexe Aktivitäten wie Gehen, Trödeln, Laufen oder Kämpfen. Die Autoren haben mehrere Systeme verglichen und fanden, dass das System, das die Aktivitäten für die Klassifizierung (im Schritt 3) nutzt, das erfolgreichste war. Eine verbesserte Erkennung solcher zielgerichteter Aktivitäten verspricht damit die Verbesserung der Leistung der Systeme der automatisierten Kameraüberwachung. Die Erkennung menschlicher Aktivität ist ein gut erforschtes Feld des Maschinellen Sehens (Aggarwal & Ryoo, 2011). Die meisten Studien fokussieren jedoch Handlungen, die im engen Personumfeld stattfinden wie Gebärden, Anziehen von Kleidung oder Putztätigkeiten. Die Ergebnisse dieser Forschung finden Anwendung im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion. Der Erkennung der Aktivität oder Interaktion anhand von Bewegungstrajektorien widmen sich nur vereinzelte Studien (Du, Chen, Xu & Li, 2006; Nguyen, Phung, Venkatesh & Bui, 2005). Diese Studien, sowie auch Burghouts et al. (2014) verwenden einen bottom-up Ansatz, in dem die Zuordnung der Aktivitäten zu den Kameraaufnahmen und bei Nguyen et al. (2005) sogar die Aktivitätstypen anhand der Daten gelernt werden. Eine Theorie darüber, wie die unterschiedliche Aktivitäten von Menschen erkannt werden, kann den bottom-up Ansatz ergänzen und zur robusten Aktivitätserkennung beitragen. Die Ergebnisse der Musteranalysen der ersten Studie dieser Doktorarbeit ermöglichen es, algorithmische Modelle der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung zu implementieren. Diese können auch zur Entdeckung und Einordnung menschlicher Aktivitäten durch Systeme zur automatisierten Überwachung genutzt werden.

Wie würde ein solches algorithmisches Modell aussehen? An dieser Stelle soll ein kurzer Entwurf vorgestellt werden. Die Musterfilme können als Filter verwendet werden, um Verfolgungsereignisse in Trajektoriedaten zu erkennen. Das rechentechnisch einfachste Vorgehen hierbei ist es, die Korrelation zwischen der zentrierten Kandidatenbewegung und dem Musterfilm zu berechnen. Um eine Kandidatenbewegung in einer Aufnahme der Überwachungskamera zu finden und zu zentrieren, können auch die restlichen Teile des menschlichen Suchprozesses implementiert werden. Das Salienzmodell von Itti und Koch (2000) kann verwendet werden, um Salienz in der Kameraaufnahme zu berechnen. Das Salienzmaximum wird dann fokussiert und verfolgt. Während der Verfolgung wird die Korrelation der verfolgten Bewegung mit

dem Musterbild berechnet und aufsummiert. Die aufsummierte Korrelation bildet ein Maß für die Evidenz einer Verfolgung. Diese Evidenz kann durch ein Diffusions-Entscheidungsmodell (Ratcliff & McKoon, 2008) ausgewertet werden, um eine Entscheidung, ob es sich um Verfolgung handelt oder nicht, zu treffen. Die Entdeckung einer Verfolgung kann wiederum genutzt werden um ein System zur automatisierten Diebstahlerkennung zu entwerfen oder um die existierenden Systeme zur automatisierten Überwachung (Burghouts et al., 2014; Marck, Bouma, Baan, de Oliveira Filho & van den Brink, 2014) zu verbessern. Dieser kurze Entwurf illustriert das Anwendungspotential der vorgelegten Arbeit.

4.4 Domänenspezifisch oder domänenallgemein?

Die Frage nach der Domänenspezifität der Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung konnte nicht eindeutig geklärt werden. In der ersten Studie konnten domänenspezifische Verfolgungsmuster während der Blickverfolgung und während der Entdeckung festgestellt werden. Die Musteranalysen der Stimuli und die Entwicklung der Entdeckungszeiten in den ersten 30 Trials legen jedoch nahe, dass die Versuchspersonen lernen, diese Muster anhand der Rückmeldung zu beachten. Dies zeigt zunächst nur, dass diese Mechanismen flexibler sind als von Scholl und Gao (2013) angenommen. Um zu behaupten, dass die Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung domänenallgemein ist, muss gezeigt werden, dass die beschriebenen Lernmechanismen die ganze Domäne der zielgerichteten Bewegung abdecken können. Es gibt andere Arten zielgerichteter Bewegung, wie etwa Annäherung, die in dieser Studie nicht untersucht wurden. Welche Bewegung zählt zu zielgerichteter Bewegung? Damit stellt sich wieder die Frage nach der Stimuluswahl, die über die Musteranalysen angegangen werden sollten. Wie bereits in der Einführung erwähnt, bietet der Fokus auf natürliche Stimuli einen anderen Ansatzpunkt. Wie sieht eine natürliche zielgerichtete Bewegung? Wann und wo im Alltag kann man diese beobachten? Letztere Frage ist schwer zu beantworten. Denkbar wäre eine Untersuchung von Verfolgungsbewegungen im Sport oder in Computerspielen. Bei diesen geht es wiederum um künstliche Situationen, die durch Befolgung künstlicher Spielregeln entstehen. Eine Untersuchung der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei Sport- oder Computerspielen könnte dennoch eine interessante Herangehensweise bieten. Zum Beispiel zeigten Taya, Windridge und Osman (2013), dass die Augenbewegungen erfahrener Tennisspieler die Ballbewegung bei der Beobachtung eines Tennisspieleres besser vorhersagen als die

Augenbewegungen von Laien. Ähnliche Vergleiche zwischen Laien und Experten in anderen Domänen in denen zielgerichtete Bewegung auftritt, wären sicher interessant. Dass es in der vorliegenden Arbeit nicht möglich war, über Musteranalysen die Domänenspezifität der Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung abzuklären, bedeutet nicht, dass Musteranalysen dies grundsätzlich nicht leisten können. Die einfachste Maßnahme die Probleme der Musteranalysen aus der ersten Studie zu vermeiden, wäre es, das Angebot an gezeigten Bewegungsarten zu verbreitern. Die perfekt zielgerichtete Bewegung (Jäger und Beute) und die zufällige Bewegung (Distraktoren) scheinen nicht die ganze Bandbreite an Stimuli, die die Versuchspersonen als zielgerichtete Bewegung akzeptieren, abzudecken.

Die Beobachtung des Lernens und der hohen Flexibilität bei der Einstufung der Verfolgung, geben einen wichtigen Impuls auch für solche Studien, die die Domänenspezifität der Mechanismen der Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung zu belegen versuchen. Hier sollte geprüft werden, inwieweit sich die Wahl der Stimuli und die Wahl der Fragestellung auf die Ergebnisse auswirken. Falls diese Auswahl zu eng ist, können die Ergebnisse des Versuchs nicht auf andere Stimuli, andere Aufgaben und auf das Alltagsverhalten verallgemeinert werden.

In der zweiten Studie wurde gezeigt, dass die Säuglinge die gewählte Lernaufgabe nicht bewältigen können. Wie bereits diskutiert wurde, ist es möglich, dass die Säuglinge an der Aufgabe scheiterten, weil sie den Zusammenhang zwischen dem Flimmern und der Verfolgung nicht herstellen konnten. Bei anderen Aufgaben, z.B. bei der Habituation (Gergely et al., 1995) oder beim präferenziellen Schauen (Rochat et al., 1997) haben die Säuglinge keine Schwierigkeit ihr Wissen über zielgerichtete Bewegung zu nutzen. Es ist eben nicht nur immer möglich, zu einer domänenspezifischen eine domänenallgemeine Erklärung zu konstruieren wie Sirois und Jackson (2007) meinten, sondern es ist meistens auch möglich (domänenallgemeine) Erklärungen dafür zu konstruieren wieso domänenspezifische Mechanismen nicht gefunden/bestätigt werden können.

Zusätzliche Versuche zur Wahrnehmung zielgerichteter Bewegung bei Säuglinge mit alternativen Versuchdesigns erscheinen für die Klärung der Frage nach der Domänenspezifität dennoch wegweisend zu sein. Versuche mit jeweils unterschiedlichem Versuchsaufbau beanspruchen unterschiedliche domänenallgemeine Fähigkeiten. Um Domänenspezifität zu verteidigen und das Scheitern der Säuglinge in der Aufgaben zu erklären, muss jeweils eine neue Erklärung mit neuen Annahmen darüber konstruiert werden, wie die Fähigkeiten interagieren um die Anwendung der domänenspezi-

fischen Prozesse zu hindern. Je mehr Versuche mit unterschiedlichem Aufbau keine domänenspezifischen Mechanismen belegen können, umso mehr Annahmen müssen gemacht werden und umso weniger plausibel wird eine Verteidigung domänenspezifischer Mechanismen. Die Säuglingsstudie der hier vorliegenden Arbeit bietet mit ihrem innovativen Versuchsdesign einen Schritt in diese Richtung.

Danksagung

Ich möchte mich bei Professorin Birgit Träuble für die Betreuung der Doktorarbeit bedanken.

Literaturverzeichnis

- Aggarwal, J. K. & Ryoo, M. S. (2011). Human activity analysis: A review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 43 (3), 16.
- Aslin, R. (1981). Development of smooth pursuit in human infants. *Eye movements: Cognition and visual perception*, 31–51.
- Aslin, R. (2007). What's in a look? *Developmental Science*, 10 (1), 48–53.
- Baker, C. L., Saxe, R. & Tenenbaum, J. B. (2009). Action understanding as inverse planning. *Cognition*, 113 (3), 329–349.
- Baluch, F. & Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in neurosciences*, 34 (4), 210–224.
- Barkow, J. H., Cosmides, L. & Tooby, J. (1995). *The adapted mind: Evolutionary psychology and the generation of culture*. Oxford University Press.
- Barnes, G. (2008). Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements. *Brain and cognition*, 68 (3), 309–326.
- Bingham, G. P., Schmidt, R. C. & Rosenblum, L. D. (1995). Dynamics and the orientation of kinematic forms in visual event recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21 (6), 1473.
- Bishop, C. M. et al. (2006). *Pattern recognition and machine learning* (Bd. 4) (Nr. 4). springer New York.
- Blythe, P., Todd, P. & Miller, G. (1999). How motion reveals intention: Categorizing social interactions. In G. Gigerenzer & P. Todd (Hrsg.), *Simple heuristics that make us smart. evolution and cognition*. (S. 257–285). Oxford University Press.
- Bouma, H., Baan, J., Burghouts, G. J., Eendebak, P. T., van Huis, J. R., Dijk, J. & van Rest, J. H. C. (2014). Automatic detection of suspicious behavior of pickpockets with track-based features in a shopping mall. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 9253, 92530F–92530F-9. Zugriff auf <http://dx.doi.org/10.1117/12.2066851> doi: 10.1117/12.2066851
- Buller, D. J. (2005). *Adapting minds: Evolutionary psychology and the persistent*

- quest for human nature*. MIT Press.
- Burghouts, G., Schutte, K., ten Hove, R.-M., van den Broek, S., Baan, J., Rajadell, O., ... others (2014). Instantaneous threat detection based on a semantic representation of activities, zones and trajectories. *Signal, Image and Video Processing*, 8 (1), 191–200.
- Carey, S. (2009). *The origin of concepts*. Oxford University Press.
- Carey, S. & Spelke, E. (1994). Domain-specific knowledge and conceptual change. *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*, 169–200.
- Dasser, V., Ulbaek, I. & Premack, D. (1989). The perception of intention. *Science*, 243 (4889), 365–367.
- de Brouwer, S., Missal, M., Barnes, G. & Lefèvre, P. (2002). Quantitative analysis of catch-up saccades during sustained pursuit. *Journal of neurophysiology*, 87 (4), 1772–1780.
- Dittrich, W. H. & Lea, S. E. (1994). Visual perception of intentional motion. *Perception*, 23, 253–253.
- Du, Y., Chen, F., Xu, W. & Li, Y. (2006). Recognizing interaction activities using dynamic bayesian network. In *Pattern recognition, 2006. icpr 2006. 18th international conference on* (Bd. 1, S. 618–621).
- Eckstein, M. P. & Ahumada, A. J. (2002). Classification images: A tool to analyze visual strategies. *Journal of vision*, 2 (1), i.
- Elman, J. L. (1998). *Rethinking innateness: A connectionist perspective on development* (Bd. 10). MIT press.
- Fehd, H. M. & Seiffert, A. E. (2008). Eye movements during multiple object tracking: Where do participants look? *Cognition*, 108 (1), 201–209.
- Fehd, H. M. & Seiffert, A. E. (2010). Looking at the center of the targets helps multiple object tracking. *Journal of vision*, 10 (4), 19.
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind: An essay on faculty psychology*. MIT press.
- Fodor, J. A. (1985). Precis of the modularity of mind. *Behavioral and brain sciences*, 8 (01), 1–5.
- Fodor, J. A. (2001). *The mind doesn't work that way: The scope and limits of computational psychology*. MIT press.
- Frankenhuis, W. E. & Barrett, H. C. (2013). Design for learning: The case of chasing. *Social Perception: Detection and Interpretation of Animacy, Agency, and Intention*, 171.

- Frankenhuis, W. E., House, B., Barrett, H. C. & Johnson, S. P. (2013). Infants' perception of chasing. *Cognition*, *126* (2), 224–233.
- Gao, T., McCarthy, G. & Scholl, B. (2010). The wolfpack effect. *Psychological Science*, *21* (12), 1845–1853.
- Gao, T., Newman, G. & Scholl, B. (2009). The psychophysics of chasing: A case study in the perception of animacy. *Cognitive psychology*, *59* (2), 154–179.
- Gao, T. & Scholl, B. (2011). Chasing vs. stalking: Interrupting the perception of animacy. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, *37* (3), 669–684.
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S. & Rubin, D. B. (2014). *Bayesian data analysis* (Bd. 2). Taylor & Francis.
- Gelman, A. & Hill, J. (2006). *Data analysis using regression and multi-level/hierarchical models*. Cambridge University Press.
- Gergely, G. & Csibra, G. (2003). Teleological reasoning in infancy: The naive theory of rational action. *Trends in cognitive sciences*, *7* (7), 287–292.
- Gergely, G., Nádasdy, Z., Csibra, G. & Biro, S. (1995). Taking the intentional stance at 12 months of age. *Cognition*, *56* (2), 165–193.
- Gopnik, A., Meltzoff, A. N. & Bryant, P. (1997). *Words, thoughts, and theories* (Bd. 1). Mit Press Cambridge, MA.
- Heider, F. & Simmel, M. (1944). An experimental study of apparent behavior. *The american journal of psychology*, *57* (2), 243–259.
- Heinen, S. J., Jin, Z. & Watamaniuk, S. N. (2011). Flexibility of foveal attention during ocular pursuit. *Journal of vision*, *11* (2), 9.
- Hoffman, J. E. & Subramaniam, B. (1995). The role of visual attention in saccadic eye movements. *Perception & psychophysics*, *57* (6), 787–795.
- Itti, L. & Baldi, P. (2009). Bayesian surprise attracts human attention. *Vision research*, *49* (10), 1295–1306.
- Itti, L. & Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision research*, *40* (10-12), 1489–1506.
- Johnson, S. P. (2011). Development of visual perception. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *2* (5), 515–528. Zugriff auf <http://dx.doi.org/10.1002/wcs.128> doi: 10.1002/wcs.128
- Karmiloff-Smith, A. (1995). *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*. MIT press.
- Khurana, B. & Kowler, E. (1987). Shared attentional control of smooth eye movement

- and perception. *Vision research*, 27 (9), 1603–1618.
- Kienzle, W., Franz, M., Schölkopf, B. & Wichmann, F. (2009). Center-surround patterns emerge as optimal predictors for human saccade targets. *Journal of vision*, 9 (5), 1–15.
- Klein, A. M., Zwicker, J., Prinz, W. & Frith, U. (2009). Animated triangles: An eye tracking investigation. *The quarterly journal of experimental psychology*, 62 (6), 1189–1197.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B. & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision research*, 35 (13), 1897–1916.
- Krekelberg, B. (2008). Motion detection mechanisms. *The senses: A comprehensive reference*, 133–155.
- Lee, M. D. (2011). How cognitive modeling can benefit from hierarchical bayesian models. *Journal of Mathematical Psychology*, 55 (1), 1–7.
- Leslie, A. M. (1994). Tomm, toby, and agency: Core architecture and domain specificity. *Mapping the mind: Domain specificity in cognition and culture*, 119–148.
- Marck, J. W., Bouma, H., Baan, J., de Oliveira Filho, J. & van den Brink, M. (2014). Finding suspects in multiple cameras for improved railway protection. In (S. 92530H–92530H).
- Meyer, C. H., Lasker, A. G. & Robinson, D. A. (1985). The upper limit of human smooth pursuit velocity. *Vision research*, 25 (4), 561–563.
- Meyerhoff, H. S., Huff, M. & Schwan, S. (2013). Linking perceptual animacy to attention: Evidence from the chasing detection paradigm. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 39 (4), 1003.
- Meyerhoff, H. S., Schwan, S. & Huff, M. (2014a). Interobject spacing explains the attentional bias toward interacting objects. *Psychonomic bulletin & review*, 21 (2), 412–417.
- Meyerhoff, H. S., Schwan, S. & Huff, M. (2014b). Perceptual animacy: Visual search for chasing objects among distractors. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 40 (2), 702.
- Michotte, A. (1963). *The perception of causality*. Oxford, England: Basic Books.
- Milner, A. & Goodale, M. (1995). *The visual brain in action*. Oxford University Press.
- Nelder, J. A. & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7 (4), 308–313.
- Neri, P. & Levi, D. M. (2006). Receptive versus perceptive fields from the reverse-

- correlation viewpoint. *Vision research*, 46 (16), 2465–2474.
- Newell, A. (1973). You can't play 20 questions with nature and win: Projective comments on the papers of this symposium. In W. Chase (Hrsg.), *Visual information processing* (S. 283–308). Academic Press.
- Nguyen, N. T., Phung, D. Q., Venkatesh, S. & Bui, H. (2005). Learning and detecting activities from movement trajectories using the hierarchical hidden markov model. In *Computer vision and pattern recognition, 2005. cvpr 2005. iee computer society conference on* (Bd. 2, S. 955–960).
- Peirce, J. (2007). Psychopy–psychophysics software in python. *Journal of neuroscience methods*, 162 (1-2), 8–13.
- Perruchet, P. & Pacton, S. (2006). Implicit learning and statistical learning: One phenomenon, two approaches. *Trends in cognitive sciences*, 10 (5), 233–238.
- Pieh, C., Proudlock, F. & Gottlob, I. (2012). Smooth pursuit in infants: maturation and the influence of stimulation. *British journal of ophthalmology*, 96 (1), 73–77.
- Pinker, S. (1999). How the mind works. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 882 (1), 119–127.
- Pratt, J., Radulescu, P. V., Guo, R. M. & Abrams, R. A. (2010). It's alive! animate motion captures visual attention. *Psychological science*, 21 (11), 1724–1730.
- Ratcliff, R. & McKoon, G. (2008). The diffusion decision model: theory and data for two-choice decision tasks. *Neural computation*, 20 (4), 873–922.
- Richardson, R. C. (2007). *Evolutionary psychology as maladapted psychology*. MIT press Cambridge, MA.
- Ringach, D., Hawken, M. J. & Shapley, R. (2002). Receptive field structure of neurons in monkey primary visual cortex revealed by stimulation with natural image sequences. *Journal of vision*, 2 (1), 2.
- Ringach, D. & Shapley, R. (2004). Reverse correlation in neurophysiology. *Cognitive science*, 28 (2), 147–166.
- Robinson, D. (1965). The mechanics of human smooth pursuit eye movement. *The journal of physiology*, 180 (3), 569–591.
- Rochat, P., Morgan, R. & Carpenter, M. (1997). Young infants' sensitivity to movement information specifying social causality. *Cognitive Development*, 12 (4), 537–561.
- Rochat, P., Striano, T., Morgan, R. et al. (2004). Who is doing what to whom? young infants' developing sense of social causality in animated displays. *Perception*,

33 (3), 355–370.

- Roux, P., Passerieux, C. & Ramus, F. (2013). Kinematics matters: A new eye-tracking investigation of animated triangles. *The quarterly journal of experimental psychology*, 66 (2), 229–244.
- Salvucci, D. D. & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the 2000 symposium on eye tracking research & applications* (S. 71–78).
- Scholl, B. & Gao, T. (2013). Perceiving animacy and intentionality: Visual processing or higher-level judgment? In M. D. Rutherford & V. A. Kuhlmeier (Hrsg.), *Social perception: Detection and interpretation of animacy, agency and intention* (S. 197–230). MIT Press.
- Scholl, B. & Tremoulet, P. (2000). Perceptual causality and animacy. *Trends in cognitive sciences*, 4 (8), 299–309.
- Schütz, A. C., Delipetkos, E., Braun, D. I., Kerzel, D. & Gegenfurtner, K. R. (2007). Temporal contrast sensitivity during smooth pursuit eye movements. *Journal of vision*, 7 (13), 3.
- Sirois, S. & Jackson, I. (2007). Social cognition in infancy: A critical review of research on higher order abilities. *European Journal of Developmental Psychology*, 4 (1), 46–64.
- Sirois, S. & Jackson, I. R. (2012). Pupil dilation and object permanence in infants. *Infancy*, 17 (1), 61–78.
- Solomon, J. A. (2002). Noise reveals visual mechanisms of detection and discrimination. *Journal of vision*, 2 (1), 7.
- Steinman, R. M., Skavenski, A. A. & Sansbury, R. V. (1969). Voluntary control of smooth pursuit velocity. *Vision research*, 9 (9), 1167–1171.
- Tafreshi, D., Thompson, J. J. & Racine, T. P. (2014). An analysis of the conceptual foundations of the infant preferential looking paradigm. *Human Development* (57), 222–240.
- Takarae, Y., Minshew, N. J., Luna, B., Krisky, C. M. & Sweeney, J. A. (2004). Pursuit eye movement deficits in autism. *Brain*, 127 (12), 2584–2594.
- Taya, S., Windridge, D. & Osman, M. (2013). Trained eyes: experience promotes adaptive gaze control in dynamic and uncertain visual environments. *PLOS ONE*, 8 (8), e71371.
- Thelen, E. & Smith, L. B. (1996). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT press.

- Tremoulet, P. & Feldman, J. (2000). Perception of animacy from the motion of a single object. *Perception*, *29* (8), 943–952.
- Troje, N. F. (2008). Biological motion perception. *The senses: A comprehensive reference*, *2*, 231–238.
- Victor, J. (2005). Analyzing receptive fields, classification images and functional images: Challenges with opportunities for synergy. *Nature neuroscience*, *8* (12), 1651–1656.
- Von Hofsten, C. & Rosander, K. (1997). Development of smooth pursuit tracking in young infants. *Vision research*, *37* (13), 1799–1810.
- Wasserman, L. (2004). *All of statistics: a concise course in statistical inference*. Springer.
- Watamaniuk, S. & Heinen, S. (2014). Attention allocation during pursuit is broad and symmetric, but can be limited by set size and crowding. *Journal of vision*, *14* (10), 497–497.
- Zackon, D. H. & Sharpe, J. A. (1987). Smooth pursuit in senescence: effects of target acceleration and velocity. *Acta oto-laryngologica*, *104* (3-4), 290–297.