

Psychophysische Untersuchungen zur Rolle der Fovea centralis bei der Bewegungswahrnehmung

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften

am Fachbereich Biologie
der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Rüdiger Hesse
geboren am 16.02.1972 in Mainz

Mainz, August 2005

Tag der mündlichen Prüfung: 22. September 2005

1 Einleitung	4
1.1 Visuelle Wahrnehmung	4
1.2 Die Bewegungswahrnehmung	4
1.3.1 Rekonstruktion der Umgebung mit zwei Netzhautbildern	7
1.3.2 Die Sehbahn – vom Photorezeptor bis zum primären visuellen Kortex	8
1.3.3 Verarbeitung in den visuellen Bereichen des Großhirns	10
1.3.4 Verarbeitungswege des Bewegungssehens	12
1.4 Fragestellung dieser Arbeit	12
2 Material und Methode	14
2.1 Allgemeine Versuchsbeschreibung	14
2.2 Versuchspersonen	14
2.3 Versuchsdurchführung	14
2.4 Versuchsmuster	16
2.5 Verwendete Geräte	16
2.6 Verwendete Computerprogramme	19
3 Induktion von Scheinbewegungen durch Kreisbewegungen	20
3.1 Versuche mit einem zunächst unbewegten, zentralen Objekt	20
3.1.1 Verschiedene homogene konzentrische Kreismustern und verschiedene Amplituden des induzierenden Musters	25
3.1.2 Kompensationsbewegungsmessungen verschiedener Mustertypen	29
3.1.2.1 Muster generiert nach exponentiellen Funktionen	29
3.1.2.2 Versuch	34
Diskussion aller Versuche 3.1	38
3.2 Versuche mit kreisenden Bewegungen intakter Muster	45
3.2.1 Intakte physiologisch angepasste vs. homogene Muster	45
3.2.2 Intakte transparente Muster, verschiedene homogene Muster in variablen Exzentrizitäten	49
3.2.2.1. Vorversuch: Finden der optimalen Rasterung des Hintergrundmusters	50
3.2.2.2 Vergleich der geometrisch variierten Muster untereinander	54
Diskussion der Versuche 3.2	59

4	Induktion von Scheinbewegungen mit Hilfe horizontal bewegter Muster	62
4.1	Induktion von Scheinbewegung mit Hilfe homogener Punktmuster	62
4.2	Bewegungsinduktion der Fovea	70
4.3	Versuch mit variierten Funktionsmuster bei einer linearen Bewegung	74
4.4	Messung der Bewegungsinduktion bei Entkoppelung von Musterpunktgröße und -abstand	80
4.5	Induktion von Scheinbewegungen bei unterschiedlicher Position und Größe des unbewegten Objektes	85
5	Abschließende Beurteilung der Versuchsergebnisse	92
6	Zusammenfassung	97
7	Anhang: Programm Quelltext	99
8	Literaturverzeichnis	108

1 Einleitung

1.1 Visuelle Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung ist beim Menschen ein äußerst komplexer Vorgang, durch den bei jedem Individuum die Illusion einer nahezu exakten Abbildung der Umgebung erzeugt wird. Viele Beschränkungen des Sehsystems fallen dem Individuum im Alltag nicht auf.

1.2 Die Bewegungswahrnehmung

Die Wahrnehmung von Bewegung ist für uns streng limitiert. Die Bewegung des Stundenzeigers auf der Uhr sehen wir zum Beispiel nicht, da sie zu langsam für unsere Wahrnehmung ist. Ebenso können zu schnelle Bewegungen, wie die Bewegung von Radkappen bei schnell fahrenden Autos, nicht wahrgenommen werden.

Die für uns wahrnehmbare Bewegung muss, wenn man einzelne Aspekte der Bewegungswahrnehmung genauer untersuchen will, weiter differenziert werden.

So sollte man zwischen der Bewegung eines Objektes im Gesichtsfeld, der Bewegung des gesamten Gesichtsfeldes bei Eigenbewegung, Bewegung der Augen oder der Relativbewegung bei Ortsveränderung des gesamten Körpers unterscheiden. Ferner kommt es durch die schnelle Verarbeitung des visuellen Systems häufig zu Bewegungstäuschungen, dem Auftreten sogenannter Scheinbewegungen.

Ein sich in unserem Gesichtsfeld bewegendes Objekt wird von uns als bewegt wahrgenommen. Wenn uns das Objekt nicht bekannt ist, richten wir unseren Blick auf dieses Objekt, um es zu erkennen und seine Bedeutung für uns einschätzen zu können. Hierbei wird zunächst eine Zielbewegung unseres Blickes auf das Objekt erfolgen und anschließend eine Folgebewegung stattfinden. Bis wir das Objekt klassifiziert haben, richten wir darauf unsere Aufmerksamkeit.

Großflächige Reize, wie die Verschiebung des gesamten Umfeldes, können nicht von einer Eigenbewegung unterschieden werden, was zur Auslösung von Bewegungsreflexen führen kann. So wird zum Beispiel auf Jahrmärkten oft die „Fahrt“ in einer so genannten „Hexenschaukel“ angeboten, bei der jedoch nicht nur die Schaukel, sondern auch der darum befindliche Raum bewegt wird. Dennoch reagieren die in der Schaukel Sitzenden reflexartig auf Richtungsänderungen des sie umgebenden Raumes durch das Verlagern ihres Körpergewichts. Der gleiche Effekt kann auch auftreten, wenn man aus einem stillstehenden Zug am Bahnhof den benachbarten Zug anfahren sieht. Auch hier wird die gesehene Bewegung als Eigenbewegung fehlinterpretiert und eventuell sogar versucht, diese durch eine Veränderung der Körperhaltung zu kompensieren.

Wird die Bewegung eines Objektes schneller, als das wir ihr sinnvoll folgen könnten (um ca. 120° Sehwinkel/s), wird ein optokinetischer Nystagmus ausgelöst, das heißt unsere Augen versuchen durch schnelle Sprünge und anschließende langsamere Bewegungen Einzelbilder zu erfassen. Dies passiert zum Beispiel bei einer Zugfahrt mit Blick auf die vorbeiziehende Tunnelwand.

Durch das Bewegen der Augen erzeugen wir Bewegungen, die wir als solche gar nicht wahrnehmen. Um der Adaptation der Photorezeptoren entgegenzuwirken, müssen unsere Augen ständig in Bewegung bleiben, um dem „Eigengrau“ entgegenzuwirken. Das „Eigengrau“ ist die Wahrnehmung der gemeldeten mittleren Reizintensität jedes einzelnen Photorezeptors bei gelähmten Augenmuskeln. Es resultiert aus der innerhalb weniger Sekunden stattfindenden Adaptation der Photorezeptoren, also einer Anpassung des Signals an die zeitlich gemittelte vorherrschende Lichtintensität. Die nachgeschalteten Neurone differenzieren nur eine Veränderung der Signale der Fotorezeptoren, weshalb ein konstantes Signal nicht wahrgenommen werden kann. Unsere Augen sind immer in Bewegung, damit die Photorezeptoren regelmäßig verschiedene Signale empfangen können und die Photorezeptoren nicht adaptieren. Diese notwendige, ständige langsame Augenbewegung (Drift) nehmen wir nur unter besonderen Bedingungen bewusst wahr.

Auch stärkere Sprünge der Augenbewegung werden bewusst ausgeblendet, wie die Sakkaden beim Lesen eines Textes. Dabei wird mit drei bis fünf Sprüngen entlang einer Zeile ein Text gelesen. Dies nehmen wir nicht als eine Bewegung der Umgebung wahr. Sehen wir einer gegenüber stehenden Person in die Augen, sehen

wir die Bewegung ihrer Augen beim abwechselnden Fixieren unserer Augen. Schauen wir unsere eigenen Augen abwechselnd im Spiegel an, können wir diese Bewegung hingegen nicht beobachten.

Die Unterdrückung der Bewegungswahrnehmung bei jeder motorischen Bewegung lässt sich vollständig durch das Reafferenzprinzip erklären. Dieses erklärt die Einschränkung der Bewegungswahrnehmung. Durch das Auslösen motorischer Signale (Efferenz) wird eine Kopie (Efferenzkopie) des Signals behalten. Jetzt kann das Gehirn dieses mit dem tatsächlichen, neuen Eindruck (Reafferenz) von einander abziehen. Sind Vorausberechnung und Wahrnehmung nach einer Augenbewegung identisch, hat tatsächlich keine Bewegung stattgefunden und das gesehene Objekt wird nicht als bewegt wahrgenommen.

Auch die Bewegung eines Objektes durch parallaktische Verschiebung sehen wir (und nutzen wir zur Entfernungsbestimmung), nehmen aber dabei nicht das Objekt selber als bewegt wahr. So sehen wir zum Beispiel die Bewegung der Äste durch eine Veränderung der Perspektive beim Vorübergehen an einem Baum, nehmen den Baum an sich aber als unbewegt wahr. Dies zeigt, dass die Wahrnehmung tatsächlich stattfindender Bewegung von einer übergeordneten Objekterkennung vollständig unterdrückt werden kann.

Umgekehrt ist es allerdings auch möglich, Bewegungen wahrzunehmen, die es gar nicht gibt. So sehen wir im Kino deutliche Bewegungen der Schauspieler, obwohl uns nur 20 bis 25 einzelne Standbilder pro Sekunde als eine Art Diaschau gezeigt werden. Dieser Effekt lässt sich durch die Bewegungsfusion erklären. Treffen räumlich benachbarte Einzelreize acht bis zehn Mal pro Sekunde auf die Retina, werden diese nicht mehr getrennt von einander aufgelöst, sondern als fließende Bewegung gesehen. Dennoch können auch wesentlich schnellere Einzelbewegungen an sich noch aufgelöst werden. So können wir aus den Augenwinkeln, gerade bei Dunkelheit (oder allgemein bei großen Kontrasten) das 50 Hz Flimmern von Neonröhren zeitlich auflösen. Es scheint dabei ein zweites, zeitlich feiner aufgelöstes System aktiv zu sein. Bei elektrophysiologischen Untersuchungen des Bewegungssehens konnte gezeigt werden, dass es abhängig von der Geschwindigkeit des bewegten Objektes mindestens zwei verschiedene subkortikale Mechanismen für die Wahrnehmung von Bewegungen gibt.

Um die einzelnen Aspekte des Bewegungssehens genauer untersuchen zu können müssen auch die weiteren Komponenten der visuellen Wahrnehmung genauer betrachtet werden.

1.3.1 Rekonstruktion der Umgebung mit zwei Netzhautbildern

Beide Augen erzeugen jeweils ein Netzhautbild mit horizontal leicht versetztem Blickwinkel. Aus der Rekonstruktion der dreidimensionalen Umgebung aus diesen zwei zweidimensionalen Bildern resultieren zahllose Probleme. Diese werden zum Teil nicht bewusst wahrgenommen. Die Bilder beider Augen werden im Gehirn zusammengefügt, so dass der Eindruck entsteht, man habe nur ein einziges Auge, das so genannte Zyklopenauge. In jedem Auge werden beim Betrachten eines Objektes weitere Objekte abhängig von deren Entfernung in beiden Augen auf geringfügig unterschiedlichen Positionen der Netzhaut projiziert. Diesen relativen Unterschied zwischen den beiden Positionen eines Objektes auf beiden Netzhäuten nennt man die Querdisparität. Diese kann zur genaueren räumlichen Einordnung eines Objektes neuronal genutzt werden. Allerdings scheint eine relativ grobe Entfernungsbestimmung auch völlig ohne Querdisparität zu funktionieren. Im Kino zum Beispiel hat jeder Teil des Bildes den gleichen Abstand, dennoch erscheint die Landschaft oder Architektur im Film dem Betrachter nahezu räumlich. Die Entfernungsbestimmung mit Hilfe von Querdisparität ist limitiert durch die minimale physiologisch bedingte räumliche Auflösung eines Auges, etwa 0,5 Bogenminuten. Die Entfernungsbestimmung mittels Querdisparität wird dadurch in der Praxis auf Abstände weit unter 50m reduziert. Das neuronal fusionierte und wesentlich höher aufgelöste Zyklopenauge hat hingegen eine Auflösung von nur wenigen Bogensekunden. Diese Genauigkeit kann allerdings nicht zur Ermittlung der Querdisparität verwendet werden, die von der Auflösung nur eines Auges begrenzt wird.

Die Beschränkung der Entfernungsbestimmung mittels Querdisparität wird durch einige weitere Informationsquellen, wie zum Beispiel Objektgröße, Kontrast und Objekthelligkeit, kompensiert. Sogar die Kategorie und das übliche Verhalten des Objektes werden zur Ermittlung von Objektgröße und -verhalten herangezogen.

1.3.2 Die Sehbahn – vom Photorezeptor bis zum primären visuellen Kortex

Die Photorezeptoren für das Sehen am Tage (photopisches Sehen) werden Zapfen genannt. Es gibt drei unterschiedliche Zapfentypen, diese nehmen jeweils Licht unterschiedlicher Wellenlänge wahr. Man spricht vom L-, M- und S-Zapfen (*long*, *medium* und *short*, nach dem Wellenlängenbereich des Lichtes) oder auch vereinfacht von Rot-, Grün- und Blauzapfen. Die Stäbchen genannten Photorezeptoren sind nur bei zunehmender Dämmerung (dem *mesopischen* Sehen mit Zapfen und Stäbchen) oder nahezu völliger Dunkelheit (dem *skotopischen* Sehen) aktiv, sie nehmen vor allem Licht mittlerer Wellenlänge wahr. Nicht alle Photorezeptoren werden auf der Netzhaut (Retina) gleichberechtigt ausgewertet. Es gibt wesentlich weniger Ganglienzellen, also Neurone, welche die elektrische Information der Photorezeptoren von den Bipolarzellen der Netzhaut erhalten und durch den Sehnerv ins Gehirn weiterleiten, als Photorezeptoren. Etwa die Hälfte der Ganglienzellen werten nur einen Bereich von ca. 1,2-1,4° Sehwinkel aus, nämlich die Sehgrube, die *Fovea centralis*, kurz Fovea genannt. Nur hier gibt es für jeden Photorezeptor eine eigene Ganglienzelle, sogar mehr Ganglienzellen als Photorezeptoren. Jenseits der Sehgrube wird das Signal von durchschnittlich 300 Photorezeptoren nur durch eine einzige Ganglienzelle weitergeleitet. In der äußeren Peripherie kann dieses Verhältnis bis zu 3000 Photorezeptoren pro Ganglienzelle betragen, diese Ganglienzellen sind mit zahlreichen Photorezeptoren verknüpft, sie haben also ein dendritisches Feld. Neuroanatomisch konnten, abhängig von der Art und Größe dieser Verknüpfung einer Ganglienzelle, drei verschiedene Typen von Ganglienzellen benannt werden, die Y-, X- und W-Zellen. Zentral überwiegen X-Zellen¹, in der Peripherie der Retina Y-Zellen² mit größeren dendritischen Feldern. Einige Ganglienzellen bewerten nur das Verhältnis der Signale der unterschiedlichen Photorezeptoren untereinander zwischen dem Zentrum und der Peripherie ihres dendritischen Feldes. So gibt es zum Beispiel S-on-Ganglienzellen, die nur auf eine Steigerung des Signals der Blauzapfen ihres dendritischen Feldes mit Steigerung ihrer Aktivität reagieren.

¹ X-Zellen werden auch als *midget ganglion cells* bezeichnet, sie entsprechen im Wesentlichen den P-Zellen.

² Y-Zellen werden auch Schirmzellen oder *parasol ganglion cells* genannt, sie entsprechen in etwa den M-Zellen

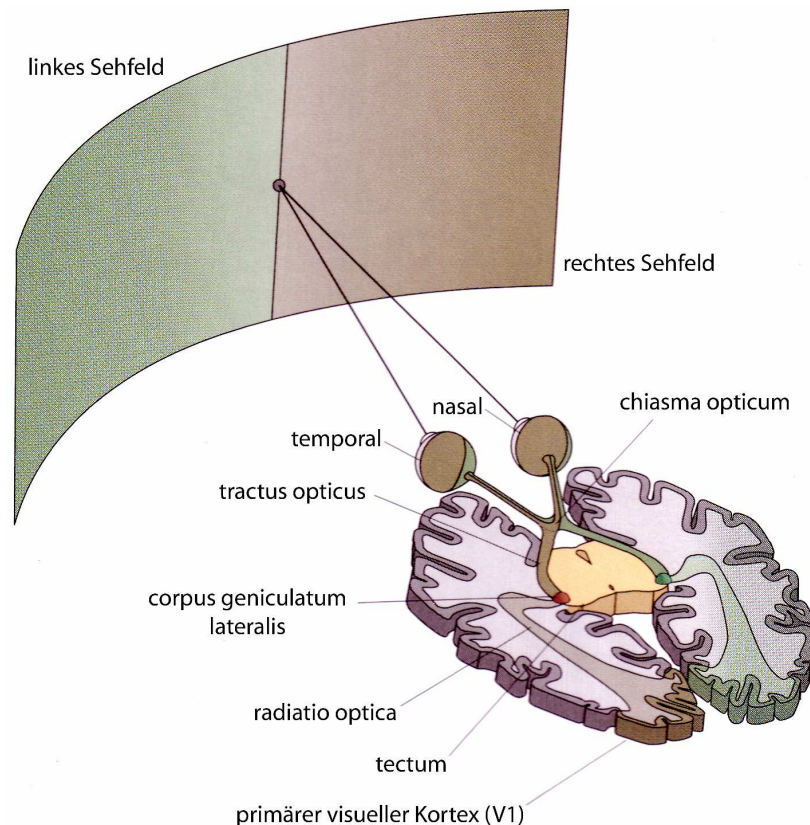


Abb. 1.1: Die Sehbahn (nach Rodieck, modifiziert): Im *Chiasma opticum* kreuzt der nasale Teil der Ganglienzellaxone eines Auges des *Nervus opticus* und wird über den *Tractus opticus* in das jeweilige *Corpus geniculatum lateralis* (CGL) weitergeleitet. Über die Sehstrahlen (*Radiatio optica*) projiziert das CGL in die primäre visuelle Großhirnrinde (V1). Der Teil des Mittelhirns (tectum), der bei niederen Wirbeltieren in erster Linie die optische Wahrnehmungsarbeit leistet (*tectum opticum*), dient bei Primaten (dort: *colliculus superior*) nur für optische reflektorische Reaktionen.

In jeder Hirnhälfte gibt es ein subkortikal (also nicht dem Großhirn zugehöriges) auswertendes Zentrum, das *Corpus geniculatum lateralis* (CGL, in der englischsprachigen Literatur auch als *LGN* bezeichnet), das über jeweils sechs Schichten verfügt. Die Eingänge des nasalen Bereiches jeden Auges speisen in die Schichten zwei, drei und fünf ein, die des temporalen Bereiches in die Schichten eins, vier und sechs. In den Schichten eins und zwei finden sich vor allem große Zellen (**magnozellulär**), die weiteren Schichten beinhalten vor allem kleinere Zellkörper (**parvozellulär**). Die Y-Zellen der Retina sind vor allem mit dem magnozellulären Bereich verbunden, X-Zellen eher mit dem parvozellulären Bereich. Vom CGL wird die Information über die *Radiatio optica* (Sehstrahlung) in den primären visuellen Kortex (V1) weitergeleitet. Zwischen diesen Schichten des CGL hat man einen weiteren dreischichtigen Verarbeitungsweg, den **koniozellulären** Weg (von griechisch *κονιος*, Staub) entdeckt, auf dessen Funktion später in der Arbeit

eingegangen wird. Vom CGL werden die Sehstrahlen in den primären visuellen Kortex (V1) weitergeleitet.

Andere periphere Ganglienzellen des Sehnervs strahlen direkt in den *Colliculus superior* aus. Dieser entspricht dem Sehzentrum (Mittelhirn), dem *Tectum opticum* niederer Wirbeltiere, die über keinen visuellen Kortex im Großhirn (*Telencephalon*) verfügen. Bei Primaten vermittelt er vor allem Mittelhirnreflexe wie das Scharfstellen der Augen für unterschiedliche Entfernungen (die Akkomodation), sakkadische Blickmotorik über die Augenmuskeln, den Lidreflex und Regulation der Pupillengröße. Der Beitrag des *Colliculus superior* zur Sinnesleistung des Sehens lässt sich bei gesunden Menschen durch psychophysische Experimente nicht von dem des visuellen Kortex unterscheiden. Man nennt ihn auch „zweites visuelles System“.

Die neuronale Verknüpfung der visuellen Wahrnehmung mit anderen Sinnesleistungen im Gehirn - wie etwa die akustische Lokalisation von Ereignissen für ein späteres Fixieren mit der Fovea oder das Sehen des Horizontes mit dem Schweresinn für die Wahrnehmung der Lotrechten (*Aubert-Phänomen*) - ist psychophysisch kaum trennbar. Gerade die neuronalen Verknüpfungen dieser unterschiedlichen Zentren miteinander finden überwiegend im Hirnstamm statt.

1.3.3 Verarbeitung in den visuellen Bereichen des Großhirns

Bis in das visuelle Kortexareal 1 (V1) ist die Überrepräsentation der Ganglienzellen in der Fovea auch in der räumlichen Struktur und Zellanzahl in den einzelnen subkortikalen Schichten verwirklicht. Der räumliche Aufbau der die visuelle Information verarbeitenden Schichten und auch die Zellanzahl sind der Geometrie der retinalen Ganglienzellen nahezu vollständig nachempfunden. So verarbeitet auch etwa die Hälfte aller Neurone bis in V1 nur den Input aus der Fovea. In V1 werden magnozellularer und parvozellularer Bereich zunächst getrennt weiterverarbeitet. Die Hauptaufgabe des V1 liegt in der Kantenerkennung. Die Informationen werden getrennt und an weiterführende Areale verteilt.

In den nachfolgenden visuellen Gehirnarealen V2, V3 und V4 entspricht die räumliche Anordnung der Neurone dieser Kortexareale noch jener der retinalen Ganglienzellen, man spricht von der Retinotopie. Benachbarte Neurone in diesen Arealen repräsentieren benachbarte Ganglienzellen in der Retina. Mit zunehmender

Entfernung von den noch retinotop organisierten Kortexarealen werden die Neurone zunehmend spezifischer in ihrer Funktion und unabhängiger von der Position der Objekte auf der Retina. In noch höheren Arealen findet man zum Beispiel Neurone, die spezifisch auf das Vorhandensein von Gesichtern oder Händen im Sehfeld reagieren, unabhängig von deren Position.

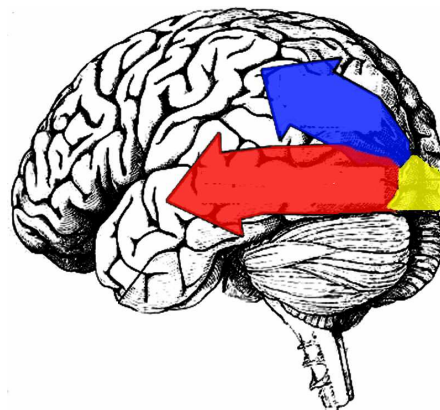


Abb. 1.2: Vom primären visuellen Kortex (gelb) ausgehend wurden Hauptverarbeitungsströme identifiziert, der über den Scheitellappen verlaufende parietale Strom (blau) und der über den Schläfenlappen verlaufende temporale Strom (rot). Die Ströme arbeiten parallel und haben unterschiedliche Aufgaben: der parietale (blaue) dient der Lokalisation und Bewegungserkennung („Wo“), der temporale (rote) klassifiziert das gesehene Objekt („Was“).

Auf kortikaler Ebene wurden bei Primaten zwei verschiedene Verarbeitungswege von V2 ausgehend identifiziert, ein dorsaler (parietaler) und ein ventraler (temporaler) Verarbeitungsweg. Diese haben unterschiedliche Aufgaben und arbeiten parallel. Stark vereinfacht wird der dorsale Verarbeitungsstrom auch „Wo“-Strom genannt, da er für die räumliche Lokalisation und Bewegungszuordnung wichtig ist, der ventrale „Was“-Strom, da er vor allem der Objekterkennung und -kategorisierung dient. Diese Aufspaltung ermöglicht eine massiv parallele, durch relativ kurze Wege und nur wenige Verschaltungen äußerst schnelle Verarbeitung der Signale. Innerhalb von nur etwa 150 ms ist die gesamte visuelle Wahrnehmung zumeist abgeschlossen.

1.3.4 Verarbeitungswege des Bewegungssehens

Speziell für das zu untersuchende Bewegungssehen wurden eigene, subkortikale Verarbeitungswege und Areale im Großhirn entdeckt.

So scheint es einen eigenen Kanal für die Wahrnehmung von langsameren Bewegungen zu geben, den magnozellulären, dorsalen Weg. Hierbei werden die wahrgenommenen Bewegungen nur über das Signal des L- und M-Zapfens im Verhältnis 2,7:1 bewertet (Vitten, 2004). Bei dem zweiten Kanal speziell für schnellere Objektbewegungen, dem koniozellulären Weg wird nur der retinal sehr grob aufgelöste S-Zapfen (Morand, Thut, et al. 2000) über die S-on-Ganglienzellen (Martin et al. 1997) für das Bewegungssehen ausgewertet.

Sämtliche Bewegungswahrnehmung scheint im Gehirn stets im visuellen Kortexareal V5 (MT) (Seghier et al, 2000) aus den Arealen V1, V3 und V3a integriert und wahrgenommenen Objekten über den parietalen, dorsalen Verarbeitungsweg („Wo“-Strom, siehe Abb. 1.2) zugeordnet zu werden. Im Jahr 2004 konnte sogar ein direkter Input in den MT vom CGL aus nachgewiesen werden (Sincich et al).

1.4 Fragestellung dieser Arbeit

In der folgenden Arbeit soll die Frage untersucht werden, in wie weit es feste geometrische, räumliche Strukturen gibt, die nur für jeweils einen Bereich des Bewegungssehen spezifisch sind.

Diese Fragestellung resultiert aus dem von *Rodieck* 1998 postulierten Ansatz, dass sich für jede visuelle Funktion des Gehirns eine „eigene Retina“ entwickelte, es also eine eigene geometrische Struktur von Ganglienzellen auf der Retina für den jeweiligen spezifischen Zweck gibt.

So wie es die Fovea gibt, also einen besonders fein gerasterten Bereich für besonders hohes Auflösungsvermögen, könnte es in der Retina analog zu dieser Fovea eine Struktur geben, die auf langsame Bewegungen spezialisiert ist. Wenn es eine solche Struktur speziell für diesen Typ Bewegungssehen gibt, müsste die Wahrnehmung eines an diese spezifische Geometrie angepassten Reizmusters anders sein als bei einem diese Struktur nicht optimal aktivierenden Muster.

In dieser Arbeit soll nun mit psychophysischen Methoden untersucht werden, ob es möglich ist, solche für das Bewegungssehen typischen Strukturen zu finden und diese gegebenenfalls näher zu betrachten. Hierbei soll durch das Erzeugen von Scheinbewegungen mit Hilfe von unbunten Mustern spezieller Geometrie

Rückschlüsse auf die Verteilung der für Bewegungsparameter kodierenden Bereiche auf subkortikaler Ebene gezogen werden. Die Hypothese ist, dass das Reizmuster mit der angepassten Geometrie die stärkste Scheinbewegung induziert.

Scheinbewegungen eignen sich für diese Untersuchung besonders, da tatsächlich keine Bewegung vorhanden ist und die Wahrnehmung dieser Bewegung durch das neuronale System selber verursacht sein muss.

2 Material und Methode

2.1 Allgemeine Versuchsbeschreibung

Die Versuche waren angelehnt an die Mondtäuschung, die man beobachten kann, wenn Schäfchenwolken (Cumulus) nachts am Himmel vorbeiziehen. Der Mond kann dadurch in die Gegenrichtung bewegt wahrgenommen werden, während die Wolken annähernd stillzustehen scheinen. Durch einen Ganzfeldreiz (Wolkenmuster am Himmel) wird dabei die wahrgenommene Bewegung auf ein unbewegtes Objekt (den Mond) übertragen.

Analog dazu wurden in einem vollständig mit lichtdichten Rollos abgedunkelten Raum auf einer Projektionsfläche bewegte Punktmuster als Ganzfeldreiz vorgeführt. In allen Versuchen sollte in einem Objekt durch ein solches Punktmuster eine Scheinbewegung induziert werden.

2.2 Versuchspersonen

In allen Versuchen wurden Studenten und Studentinnen im Alter von 22 bis 34 Jahren als Versuchspersonen eingesetzt, wobei es eine hohe Fluktuation der Versuchspersonen von Teilversuch zu Teilversuch gab.

Alle Versuchspersonen waren normalsichtige Trichromaten und durften ihre korrigierenden Augengläser benutzen. Sie erhielten keine Aufwandsentschädigung. Alle Versuche wurden jeweils mit jeder Versuchsperson einzeln durchgeführt.

2.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsperson betrachtete eine Videoprojektionsfläche auf der ein mit konstanter Geschwindigkeit bewegtes Versuchsmuster projiziert wurde. Hierbei wurde eine Scheinbewegung in einem unbewegten Objekt durch die Bewegung eines Punktmusters auf der Projektionsfläche induziert.

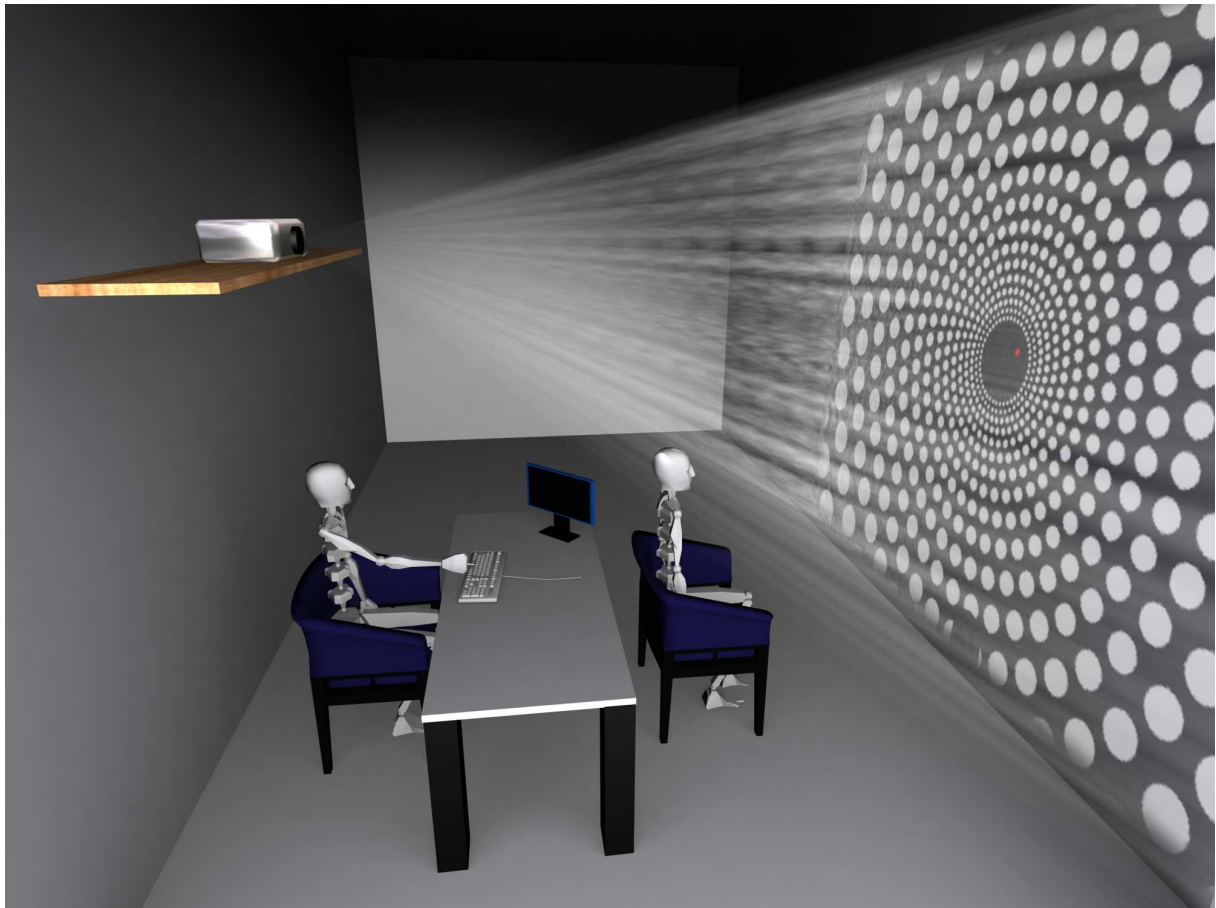


Abb. 2.1: Versuchsaufbau aller durchgeführten Versuche. Mit Hilfe des Videoprojektors (silberner Kasten links) und des PC (unter Tisch) wurden auf der Projektionsfläche die bewegten Versuchsmuster und auch die unbewegten Objekte (hier ein roter Punkt) der jeweiligen Versuchsperson (rechts) präsentiert. Die Versuchsperson konnte entweder dem Versuchsleiter (links) Anweisungen zur Einstellung geben (wie hier dargestellt) oder direkt an der Tastatur Einstellungen vornehmen.

Die Abbildung 2.1 zeigt den allgemeinen Versuchsaufbau. Bei den Versuchen im Teil 3 dieser Arbeit wurden hierfür kreisförmige um das Projektionszentrum mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Punktmuster verwendet, bei jenen im Versuchsteil 4 horizontal bewegte einfachere Punktmuster entlang der Projektionsfläche. Der Abstand der Augen der Versuchspersonen zur Projektionsfläche betrug stets etwa 160 cm.

Die Aufgabe der Versuchsperson bestand darin, entweder dem unbewegten Objekt eine Bewegung in der Art und Weise einzustellen das die wahrgenommene Bewegung dieses Objektes minimiert wurde (psychophysische Klasse A Experimente im Versuchsteil 3.1), in einem folgenden Vergleich die subjektive Qualität der Induktion der Scheinbewegung zu vergleichen (psychophysische Klasse B Experimente im Versuchsteil 3.2) oder die Schwelle der Wahrnehmung von

Scheinbewegungen zu bestimmen (psychophysische Schwellenmessungen im Versuchsteil 4).

Sofern mehrere Messungen hintereinander durchgeführt wurden, wurden diese einzelnen Messungen in zufälliger Reihenfolge durchgeführt, um ein Verfälschen der Ergebnisse durch einen eventuellen Lernvorgang der variierenden Einstellungen oder Beobachtungen bei den Versuchspersonen entgegenzuwirken. Innerhalb einer Messreihe wurden die Versuche wiederholt durchgeführt und nur von den einzelnen Versuchspersonen wiederholt eingestellte Ergebnisse gewertet.

2.4 Versuchsmuster

Die verwendeten Versuchsmuster wurden entweder zunächst mit dem in der Diplomarbeit des Autors (Hesse, 2002) erstellten Generatorprogramm erzeugt oder direkt in Echtzeit vom Versuchsprogramm errechnet und dargestellt. Die Bewegung vorgefertigter Punktmuster als Bilder ermöglichte die Verwendung komplexerer zweidimensionaler Punktmuster, die spezifisch an die Geometrie der Retina angepasste Reize ermöglichten (Versuche 3). Wesentlich einfacher strukturierte Punktmuster konnten direkt in Echtzeit von dem PC berechnet und modifiziert werden (Versuche 4).

Eine direkte Echtzeitberechnung der komplexen Muster scheiterte an der zu geringen Rechenleistung heutiger Personalcomputer.

2.5 Verwendete Geräte

Für alle Versuche wurde ein Videoprojektor ‚Liesegang DV345‘ mit einer XGA Auflösung von 1024x768 Bildpunkten und ein PC ‚Dell OptiPlex 345‘ mit einem 2,4 GHz Pentium4-Prozessor verwendet. Mit diesem wurden die Versuchsanimationen auf eine 3,2 mal 4 Meter große matt-weiße Rückseite eines Linoleumbodenbelags, der senkrecht an einer Wand angebracht war, projiziert. Für die Aufnahme der unbunten Eichkurve des Videoprojektors wurde ein Gossen Mavo-Monitor Leuchtdichtemessgerät verwendet. Dies ist nötig, da ansteigende Grauwerte des PC (von 0 bis 255) nicht zu einer direkt proportionalen Erhöhung der Leuchtdichte führen, sondern die Leuchtdichte nach einer quadratischen Funktion

vom Grauwert zunimmt. Diese Funktion wird auch als Eichkurve bezeichnet. Das Ergebnis der Ermittlung der Eichkurve zeigt Abbildung 2.2.

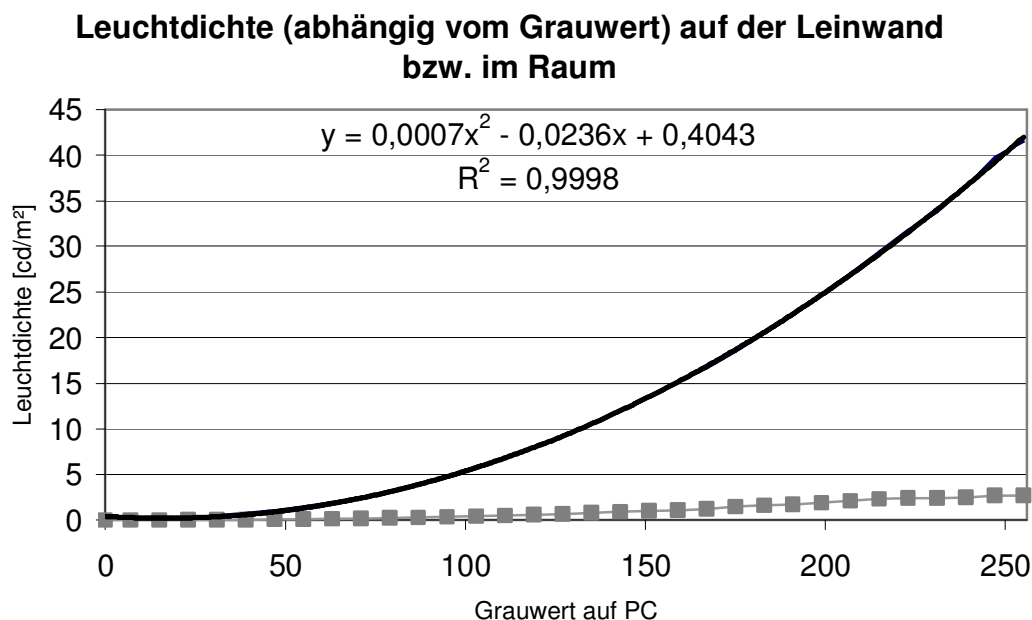


Abb. 2.2: Eichkurve (schwarz) für die Leuchtdichte und angenäherte Eichfunktion für den Videoprojektor (mit Bestimmtheitsmaß). Der PC kann unbunte Grauwerte hexadezimal (also mit Ziffern von 0 bis F) von 00 bis FF in 256 Schritten kodieren und auf dem Videoprojektor darstellen. Diese Grauwerte werden vom Videoprojektor jedoch nicht mit linear ansteigender Leuchtdichte dargestellt, sondern annähernd nach der in der Grafik dargestellten quadratischen Eichfunktion, deren statistisches Bestimmtheitsmaß (R^2) ebenfalls dargestellt ist. Die gezeigte Gleichung: **$y = 0,0007 x^2 - 0,0236 x + 0,4043$** stellt mit 99,98 prozentiger Wahrscheinlichkeit die Eichfunktion dar. Wenn die Gesamthelligkeit konstant gehalten werden soll, muss zur Errechnung der dafür nötigen Leuchtdichte diese Gleichung als hinreichend genaue Annäherung verwendet werden.

Alle Messwerte wurden bei einer einheitlichen Beleuchtung der gesamten Projektionsfläche mit einem Gossen-Mavo Monitor Leuchtdichte Messgerät aufgenommen. Um die Aufhellung des gesamten Raumes durch eine hohe Gesamthelligkeit zu verdeutlichen, wurde an der der Projektionsfläche gegenüberliegenden Wand zusätzlich die Leuchtdichte gemessen (graue Kurve).

Der Videoprojektor wurde so eingestellt, dass die nicht ausblendbaren Ränder und Rahmen der Versuchsfenster nicht sichtbar wurden. Jedes „Fenster“ in der Benutzeroberfläche Windows hat einen Rahmen und eine Titelleiste. Diese durften auf keinen Fall während der Versuche sichtbar sein, da die Darstellung dieses

Rahmens die Illusion eines Ganzfeldreizes unterbunden hätte. Mit Hilfe der Vergrößerungsfunktion des Videoprojektors wurde deshalb nur ein zentraler Ausschnitt des Bildschirmes gezeigt. Dies ermöglichte die Hardware-Zoom Stufe 2 des Gerätes, die bei jedem Versuch verwendet wurde. Die Auflösung des Projektors verringerte sich daher auf 806x616 Pixel mit einer Breite von 2338 mm und einer Höhe von 1787 mm, was einem Bereich von insgesamt 73,2° Sehwinkel Breite und 59,2° Höhe entspricht. Die meisten Messungen wurden im Zentrum dieses Bereiches durchgeführt.

Da ein auf die Wand projiziertes Pixel stets gleich groß war, war die Größe relativ zum Betrachter in Grad Sehwinkel von der Position des Pixels auf der Leinwand abhängig. Genau im Zentrum betrug die Größe eines Pixels 0,104° Sehwinkel, darüber oder darunter am unteren oder oberen Rand 0,079° Sehwinkel, links oder rechts am linken oder rechten Rand 0,068° Sehwinkel und in den äußeren Ecken der Projektionsfläche lediglich etwa 0,056° Sehwinkel.

Alle Größen- und Geschwindigkeitsangaben werden in dieser Arbeit zur Vereinfachung auf die relative zentrale Größe in Grad Sehwinkel umgerechnet.

Da aus Kostengründen statt einer hoch reflektierenden Leinwand lediglich die matt weiße Rückseite eines Linoleum-Bodenbelags verwendet wurde, resultierte daraus eine Einschränkung des möglichen projizierbaren Helligkeitsbereiches: Statt des technisch maximal möglichen Kontrastes von etwa 1:400 (nach Herstellerangabe, auf einer optimalen metallbeschichteten Leinwand) wurde so real lediglich ein maximaler möglicher Kontrast von etwa 1:85 erzielt.

Abweichend von sämtlichen anderen Versuchen wurde in Versuch 4.2 in der Mitte der Leinwand zusätzlich ein 120 x 120 cm großes, mattes Punktmusterposter zum Erzeugen eines unbewegten, rein fovealen Musters befestigt.

2.6 Verwendete Computerprogramme

Mit Hilfe des *SUN Java SDK 1.4.3*³ wurden für die Versuche *Java-Applets*⁴ vom Autor selbst programmiert. Für die Erstellung und Bearbeitung des Quellcodes wurde der *Crimson Editor 3.7*⁵ (Freeware) verwendet.

Bei *Java* handelt es sich um eine objektorientierte plattformunabhängige Programmiersprache der Firma *Sun*. *Java-Applets* sind vorkompilierte Programme, die mit dem entsprechenden „Plugin“ von allen Internetbrowsern oder auch mit dem in den Versuchen stets verwendeten *SUN-Appletviewer* ausgeführt werden können.

Die nach den verschiedenen geometrischen Funktionen generierten Versuchsmuster wurden alle mit dem vom Autor in der Diplomarbeit 2002 entwickelten Generatorprogramm erzeugt, das in *Delphi 6 (trial)* programmiert war. *Delphi* ist ein objektorientiertes *Turbo-Pascal*-Derivat der Firma *Borland*⁶ für das *Microsoft Windows* Betriebssystem, *Pascal* ist eine Programmiersprache, die aus *BASIC* entwickelt wurde.

Das Generatorprogramm kann zweidimensionale Punktmuster so erstellen, dass angepasst an die Geometrie eines vereinfachten Augenmodells Punkte in konzentrischen Kreisen mit zunehmender Entfernung vom Zentrum ihre Größe nach fest definierten Funktionen verändern. Dabei lässt sich auch die Flächenfüllung einstellen. Diese Muster wurden ferner genau so berechnet, dass sphärische Fehler durch eine planare Projektion annähernd ausgeglichen werden. Für die Nachbearbeitung der Muster, zum Beispiel für das Erzeugen transparenter Flächen und das Umkonvertieren in das *GIF*⁷-Format, wurde *Adobe Photoshop*⁸ verwendet. Abbildung 2.1 wurde mit Hilfe von *3DS-max 7.2* der Firma *AutoDesk*⁹ vom Autor gemeinsam mit Herrn Sandro Hölzel generiert.

Alle genannten Produkt- und Firmennamen sind international geschützt.

³ Kostenlos erhältlich unter <http://java.sun.com>

⁴ Siehe das Beispiel im Anhang 7

⁵ Kostenlos erhältlich unter <http://www.crimsoneditor.com>

⁶ weitere Informationen unter <http://www.borland.de>

⁷ GIF= *CompuServe graphics interchange format*. Ein Standard-Bildformat des Internets.

⁸ weitere Informationen unter <http://www.adobe.de/products/photoshop/main.html>

⁹ weitere Informationen unter <http://www4.discreet.com/3dsmax>

3 Induktion von Scheinbewegungen durch Kreisbewegungen

3.1 Versuche mit einem zunächst unbewegten, zentralen Objekt

In diesen Versuchen wird eine Scheinbewegung durch ein bewegtes Muster in einem unbewegten Punkt induziert. Die ursprüngliche Idee hinter diesem Versuch war, dass ein Reizmuster, das der geometrischen Struktur der Netzhaut ähnlich ist, für die Bewegungsinduktion geeigneter sei als ein beliebiges anderes. Somit sollte es möglich sein, über die Effektivität verschiedener Reizmuster herauszufinden, ob ein Muster mit oder ohne Fovea für die Bewegungsinduktion wirksamer ist. Abbildung 3.1 zeigt die für die Versuchsperson sichtbare Projektion.

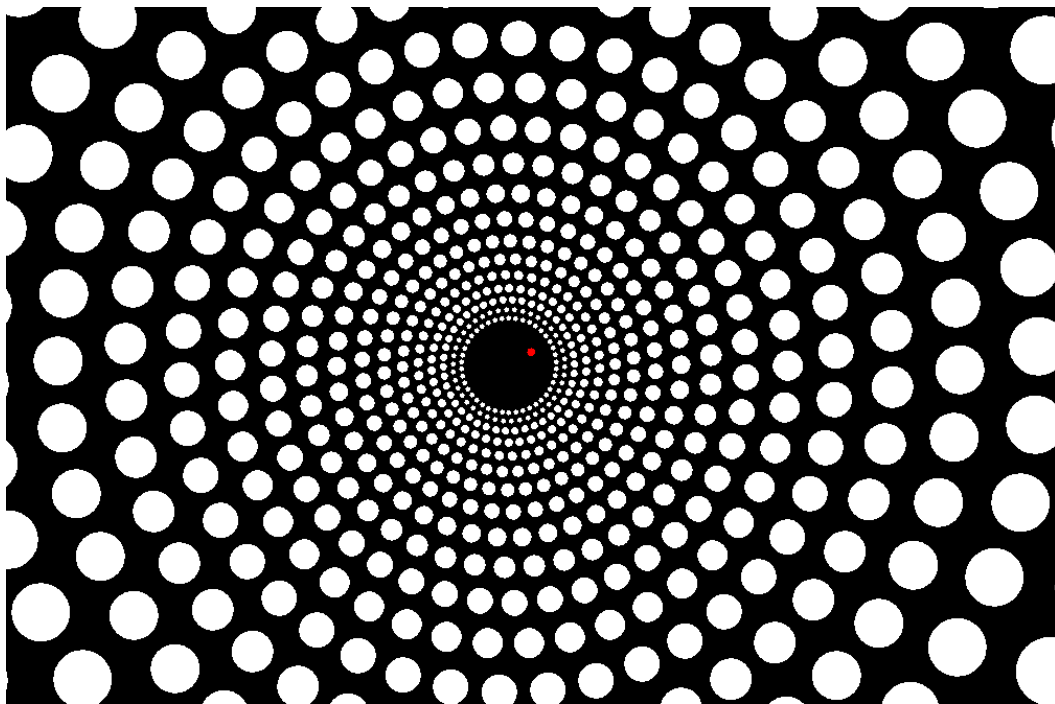


Abb. 3.1: Die für die VP sichtbare Projektion – Das weiße, starre Punktmuster wird um seinen Mittelpunkt auf einer Kreisbahn mit einer festen Geschwindigkeit konstant bewegt. Der rote zentrale Punkt ist zunächst unbewegt. Der schwarze Kreis im Zentrum hatte durch die Geometrie des Musters bedingt leicht differierende Durchmesser (zwischen 9° und 29° Sehwinkel), die jedoch in jedem Teilversuch annähernd ($\pm 2^\circ$ Sehwinkel) gleich waren.

Durch die konstante umkreisende Bewegung des statischen Punktmusterbildes wird der zentrale rote Punkt bewegt wahrgenommen. Die Versuchsperson kann nun dem roten Punkt selber eine tatsächliche nahezu beliebige Bewegung einstellen, um diesen Effekt der Bewegungsinduktion zu minimieren, die Scheinbewegung also „kompensieren“.

Kreisende Bewegungen

Das Problem bei Bewegung des Musters besteht darin, dass die Rasterung des Videoprojektors stufige, diskrete Bewegungsschritte zufolge hat und das Bild Pixel um Pixel verschoben werden muss. Gerade bei rein horizontalen, einem schwingenden Pendel ähnlichen Bewegungen tritt an den maximalen Amplituden dieser Effekt am deutlichsten sichtbar auf, da sich die Bewegungsrichtung sehr langsam umkehrt. Das Punktmuster beginnt zu ruckeln, da unterhalb einer festen Bewegungsgeschwindigkeit ($< 8-10$ Pixel/s, also unterhalb der Bewegungsfusionschwelle) das Muster nicht mehr als fließend bewegt, sondern zitternd oder springend entlang der Pixel des Projektors wahrgenommen wird. Die Rechenleistung des PCs limitiert ebenso die maximal mögliche Geschwindigkeit.

Ein Kompromiss zur Lösung dieses Problems besteht nun darin, die Bewegungsgeschwindigkeit des induzierenden Punktmusters konstant zu halten. Dies hat jedoch zufolge, dass, wenn die spezifische Geometrie des Musters annähernd an der gleichen Stelle die Netzhaut reizen soll, das Punktmuster stets im Kreis bewegt werden muss. So kann die Bewegung des Punktmusters als konstant gleichförmig wahrgenommen werden und gleichzeitig die relative Position auf der Retina annähernd konstant gehalten werden.

Auf ein starkes Verwischen des Bildes durch Defokussieren des Videoprojektors, was diesen Effekt ebenfalls reduziert hätte, musste wegen zu stark auftretender chromatischer Aberrationseffekte (also dem Auftreten farbiger Kanten an den unbunten Musterpunkten) bei den Versuchen verzichtet werden.

Die Muster wurden bei einer einheitlichen Winkelgeschwindigkeit bei zunächst zwei verschiedenen Radien von $2,6^\circ$ oder $5,19^\circ$ Sehwinkel bewegt, was bei einer Zeit pro Vollkreis von $T = 19,7$ s einer Mustergeschwindigkeit von $1,83$ bzw. $3,67^\circ$ Sehwinkel/s entspricht. Die Orientierung (oben/unten, links/rechts) der Punktmusterbilder blieb während der Bewegung gleich, jeder Punkt des Punktmusters bewegte sich gleichzeitig auf einem Kreis mit dem festem Radius.

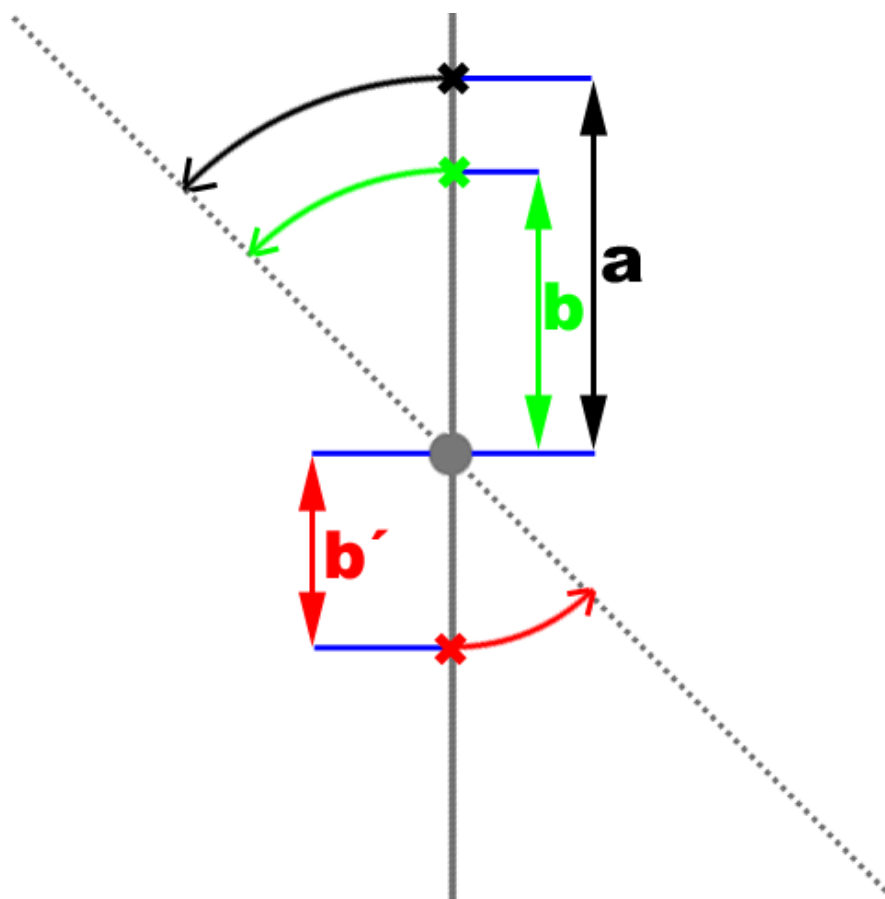


Abb. 3.2 zur Verdeutlichung der von den Versuchspersonen eingestellten Kompensationsbewegungen: Der nicht sichtbare, feste Mittelpunkt der Projektionsfläche (grauer Kreis) ist der Drehpunkt, um den jede Kreisbewegung stattfindet. Darum bewegt sich der ebenfalls nicht sichtbare Mittelpunkt des Punktmusters (schwarzes \mathbf{x}) mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω_{Muster} (hier ist eine Bewegung gegen den Uhrzeigersinn um $\pi/4$ durch den Winkel zwischen der senkrechten grauen Linie und der gepunkteten grauen Linie angedeutet) und dem fest eingestellten Radius „ \mathbf{a} “. Der zunächst unbewegte rote Punkt liegt zunächst im Mittelpunkt der Projektionsfläche, durch die Kreisbewegung des Musters wird er als bewegt wahrgenommen. Die Versuchsperson stellt nun diesem Punkt eine Bewegung in der Art ein, dass die Scheinbewegung möglichst minimal sichtbar wird. Hierzu kann sie den Radius (\mathbf{b} und \mathbf{b}') sowie die Winkelgeschwindigkeit ω_{Punkt} und die Phasenverschiebung ϕ des Punktes (hier nicht gezeigt) nahezu frei (Phasenverschiebung variierbar in $\pi/32$ -Schritten, Winkelgeschwindigkeit des roten Punktes in $\omega_{\text{Punktmuster}}/20$ -Schritten) wählen. Für ω_{Punkt} stellten alle Versuchspersonen exakt den Wert von ω_{Muster} ein, die Phasenverschiebung zwischen der Muster- und der Punktbewegung war entweder exakt in Phase ($\phi=0$) mit dem Muster (\mathbf{b}) oder um genau π verschoben (\mathbf{b}'), der rote Punkt befand sich dann an der Stelle des grünen „ \mathbf{x} “ ($\phi=0$) oder des roten „ \mathbf{x} “ ($\phi=\pi$). In diesem Versuchsteil (3.1) wird von der Kompensationsamplitude gesprochen. Diese entspricht dem dimensionslosen Zahlenwert von \mathbf{b}/\mathbf{a} . Wurde eine Phasenverschiebung zwischen Musterbewegung und Punktbewegung von $\phi = \pi$ eingestellt kann dies auch als eine Einstellung eines negativen Zahlenwertes für den Radius der Punktbewegung gesehen werden (\mathbf{b}'), weshalb die Kompensationsamplitude dann $-\mathbf{b}'/\mathbf{a}$ entspricht.

Punktmustermodifikationen

Im Zentrum des Scheinbewegung induzierenden Punktmusters musste ein direkter Kontakt von Punktmuster und dem unbewegten Punkt verhindert werden, da sonst das visuelle Phänomen der „Schreitenden-Fuß-Wahrnehmung“ (*„stepping foot illusion“*) auftritt. Dies tritt auf, wenn ein beliebiges Objekt über die Kanten eines Musters mit sehr verschiedenem Kontrast gleichförmig bewegt wird. Statt einer gleichförmigen Bewegung wird dann bei großen Kontrasten stets eine springende Bewegung, wie die von Füßen beim Treppensteigen, wahrgenommen, was durch das Zusammenspiel von lateraler Inhibition und der magnozellulären Wahrnehmung langsamer Bewegungen erklärbar ist (Anstis, 2004). Aus diesem Grund wurden in den induzierenden Punktmustern zunächst zentrale Aussparungen eingesetzt, das heißt es wurde auf eine zentrale Füllung des Punktmusters verzichtet, um einen Kontakt von unbewegtem Objekt und Punktmuster zu verhindern. Diese Aussparungen können, bedingt durch die unterschiedlichen Geometrien der Muster selber, nie exakt gleich groß sein. Dennoch wurden alle zentralen Aussparungen in jedem Teilversuch in einem etwa $\pm 2^\circ$ gleichen Größenbereich verwendet.

Ein weiteres Problem aller Versuche ist die Veränderung der Gesamthelligkeit durch Veränderungen in der Darstellung der Versuchsmuster. Eine höhere Gesamthelligkeit führt stets zu einer schnelleren neuronalen Verarbeitung und verändert so die Versuchsbedingungen erheblich. Ebenso wird die Vergleichbarkeit der Versuche verringert. Um also die Bedingungen nahezu konstant zu halten, mussten alle Muster in jedem Teilversuch eine annähernd gleiche Flächenfüllung und Musterpunktverteilung aufweisen, was aus geometrischen Gründen bei Mustern mit unterschiedlichen Punktgrößen gemäß einer mathematischen Funktion nicht exakt lösbar war.

Es wurden in diesen Versuchen daher stets weiße Musterpunkte (42 cd/m^2) auf einem schwarzen Hintergrund ($0,5 \text{ cd/m}^2$) projiziert, um eine zu deutliche Begrenzung der Projektionsfläche zu verhindern. Diese würde durch eine scharfe Kante als Abgrenzung zum Raum hin und die Beleuchtung des Raumes durch Streulicht bei einer sehr hellen Projektion und einem weißen Hintergrund die Illusion

eines Ganzfeldreizes stören. Der Durchmesser des zentralen roten Punktes betrug in allen folgenden Versuchen (Versuche 3.1) $1,6^\circ$ Sehwinkel.

Kompensationsbewegung

Die Bewegungsinduktion des zentralen, zunächst unbewegten Punktes soll von der Versuchsperson durch eine einzustellende korrigierende Kreisbewegung des zentralen Punktes selber ausgeglichen werden. Die Anweisung an die Versuchspersonen lautete, den zunächst unbewegten Punkt derart in Bewegung zu setzen, dass die Wahrnehmung einer Scheinbewegung minimiert wird.

Die Versuchsperson konnte hierbei diese Bewegung gänzlich selber gestalten, also Phase, Radius und Geschwindigkeit des zunächst unbewegten Punktes relativ zum Muster nahezu völlig frei einstellen (Phasenverschiebung variierbar in $\pi/32$ -Schritten, Winkelgeschwindigkeit des roten Punktes in $\omega_{\text{Punktmuster}}/20$ -Schritten). Es zeigte sich jedoch in jedem Versuch, dass von der Möglichkeit der Veränderung von Phase und Geschwindigkeit kein Gebrauch gemacht wurde, sondern lediglich der Radius des in Phase laufenden Punktes modifiziert wurde. Im weiteren Text wird der Radius der Bewegung des Musters als „Musteramplitude“ und der von der Versuchsperson gewählte Radius der Bewegung des Punktes als „Einstellungsamplitude“ bezeichnet. Der Wert, den man erhält, wenn man den eingestellten Radius der Punktbewegung durch den Radius der Musterbewegung teilt, wird „Kompensationsamplitude“ genannt. Zu Versuchsbeginn ist der rote Punkt unbewegt, die Kompensationsamplitude also gleich 0. Stellt die Versuchsperson dem roten Punkt den gleichen Radius für die Bewegung ein, wie sie dem Punktmuster vorgegeben ist, ist die Kompensationsamplitude 1. Abbildung 3.2 dient zur Verdeutlichung.

Versuchsdurchführung

Alle in 3.1 beschriebenen Versuche wurden mit bis zu 10 verschiedenen Versuchspersonen, alles Teilnehmer eines Fortgeschrittenenpraktikums FII jeweils einzeln durchgeführt.

Die Aufgabe der Versuchsperson bestand stets darin, dem zunächst unbewegten Punkt eine Bewegung in der Art und Weise einzustellen, dass der subjektive Eindruck der Illusion von Bewegung des Punktes minimal wurde.

3.1.1 Verschiedene homogene konzentrische Kreismustern und verschiedene Amplituden des induzierenden Musters

Dieser Versuch wurde mit vier Versuchspersonen jeweils vier Mal mit zwei verschiedenen Musteramplituden durchgeführt. Der Durchmesser der zentralen Aussparung des induzierenden Musters lag abhängig vom verwendeten Muster bei 22° Sehwinkel ($\pm 2^\circ$), die Muster wurden aus Punkten mit folgenden Größen generiert: $2,8^\circ$, $1,9^\circ$, $1,5^\circ$, $1,1^\circ$ und $0,9^\circ$ Sehwinkel (siehe Abbildung 3.3). Die Flächenfüllung im Punktmuster selber betrug konstant 35%.

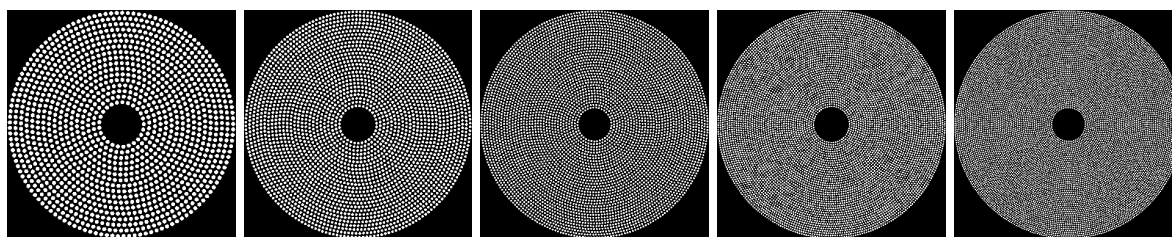


Abb. 3.3 Die Muster mit jeweils unterschiedlichen Punktgrößen: Durchmesser $2,8^\circ$, $1,9^\circ$, $1,5^\circ$, $1,1^\circ$ und $0,9^\circ$ Sehwinkel. Alle Punkte sind in konzentrischen Kreisen angeordnet. Die Muster haben eine nahezu identische Flächenfüllung von etwa 35% in der Punktmusterfläche, die zentrale Aussparung hatte eine Größe von etwa 22° Sehwinkel.

Ergebnisse 3.1.1

Alle Versuchspersonen machten lediglich von einer Veränderung der Einstellungsamplitude Gebrauch, um die Scheinbewegung des Punktes zu minimieren. Die Winkelgeschwindigkeit und die Phase des Musterpunktes wurden exakt an die des Punktmusters ($\omega_{\text{Muster}} = \omega_{\text{Punkt}}$ mit $\phi_{\text{Muster/Punkt}}=0$) angeglichen, nur eine Versuchsperson stellte eine Bewegung mit gleicher Geschwindigkeit aber einer Phasenverschiebung um $\phi_{\text{Muster/Punkt}} = \pi$ (mit $\omega_{\text{Muster}} = \omega_{\text{Punkt}}$) ein.

Da sich die eingestellte Bewegung des Punktes nur in den Radien von der Bewegung des Punktmusters unterschied, wurde nur noch diese Einstellungsamplitude relativ zur Musteramplitude als Messergebnis aufgenommen.

Dieser Wert wird auch in allen weiteren Versuchen im Teil 3.1 Kompensationsamplitude genannt und ist eine dimensionslose Zahl¹⁰.

Wurde eine Phasenverschiebung eingestellt, konnte diese bei $180^\circ (= \pi)$ auch als negativer Wert der Einstellungsamplitude angesehen werden, was zu „negativen“ Kompensationsamplituden führt (vergleiche Abb. 3.2).

Die Grafiken 3.4 und 3.5 zeigen die Mittelwerte der Kompensationsamplituden von drei Versuchspersonen. Die vierte kompensierte (wie auch in allen weiteren Versuchen des Versuchsteils 3.1) die Scheinbewegung mit Hilfe einer negativen Kompensationsamplitude, ein solches Ergebnis ist für den Versuch 3.1.2.1 exemplarisch auf Abb. 3.9 gezeigt. Eine mögliche Erklärung für eine derartige Einstellung, die bei drei von etwa 20 insgesamt getesteten Versuchspersonen auftrat, wird in der abschließenden Diskussion der Versuche 3.1 beschrieben. Aufgrund der hohen Streuungen dieser Einstellungen und der geringen Datenmenge wird jedoch auf eine Darstellung dieser Versuchsergebnisse außer in Versuch 3.1.2.1 verzichtet.

¹⁰ Kompensationsamplitude [-] = Einstellungsamplitude [° Sehwinkel] : Punktmusteramplitude [° Sehwinkel]

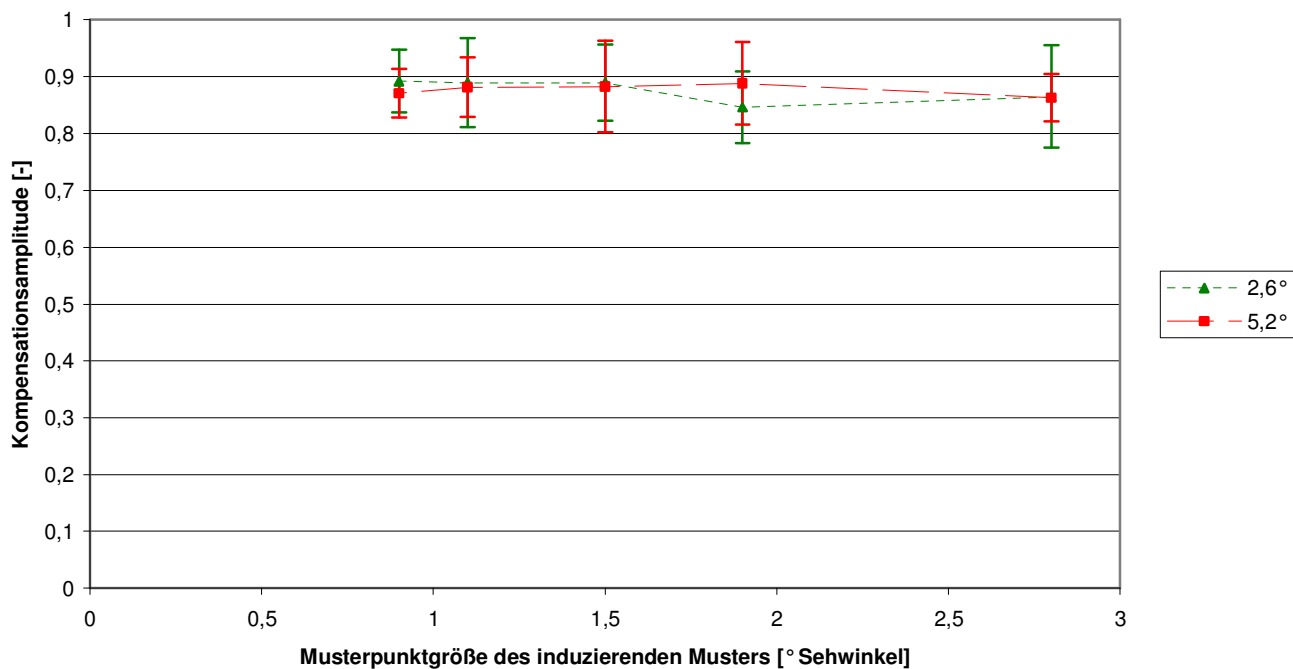
Kompensationsamplitude abhängig von der Musterpunktgröße

Abb 3.4: Die Grafik zeigt die Kompensationsamplitude relativ zur Punktgröße des Musters. Die Messpunkte entsprechen den Mittelwerten von vier Messreihen der drei positive Einstellungsamplituden einstellenden Versuchspersonen. Die grünen Dreiecke zeigen die Mittelwerte der Einstellungen der drei Versuchspersonen bei einer Musteramplitude von 2,6° Sehwinkel des induzierenden Punktmusters, die roten Quadrate bei einer Musteramplitude von 5,2° Sehwinkel. Jeder Datenpunkt entspricht zwölf Messungen. Die Fehlerbalken stellen deren Standardabweichung dar.

Kompensationsamplitude in Abhängigkeit von der Musterpunktgröße

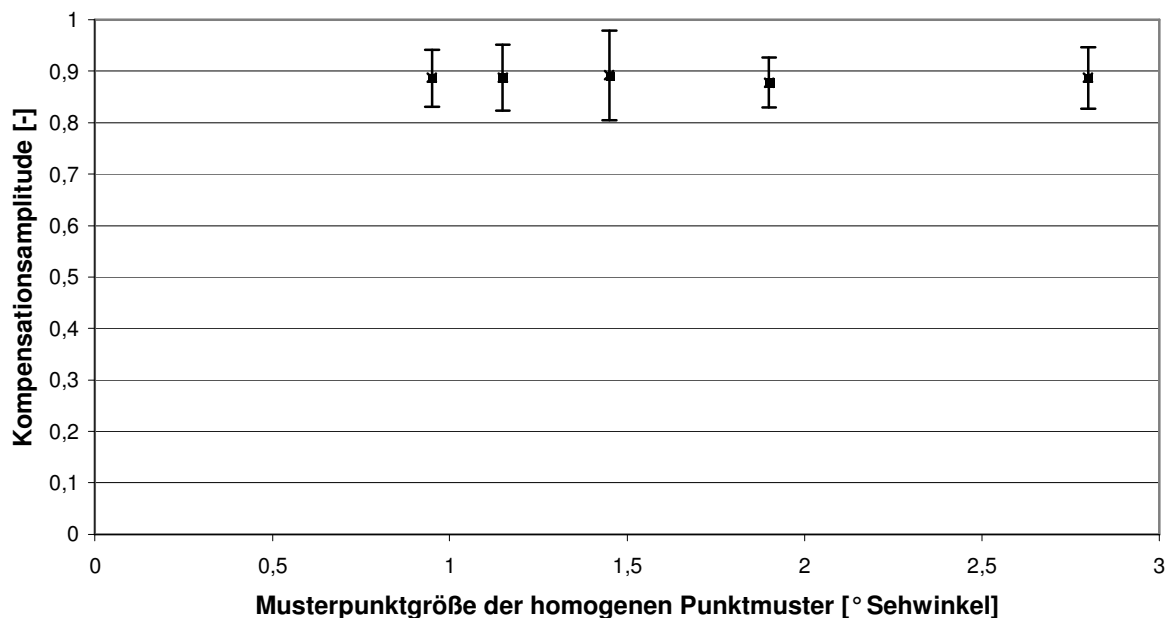


Abb. 3.5: Wie auch Abb. 3.4 zeigt diese Grafik Kompensationsamplitude in Abhängigkeit von der Musterpunktgröße des Punktmusters (X-Achse). Die Ergebnisse sind hierbei nicht wie bei Abb. 3.4 getrennt, sondern zusammengefasst. Durch die dadurch erzielte doppelte Anzahl an Messergebnissen (ein Datenpunkt entspricht nun 24 Einzelmessungen) verkleinern sich die Standardabweichungen erheblich, was für statistisch normalverteilte Daten typisch ist.

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse des Versuches 3.1.1

Die Winkelgeschwindigkeit und die Phase des zentralen Punktes werden von allen Versuchspersonen zur Minimierung der Scheinbewegung im Rahmen der Einstellungsmöglichkeiten genau der des Punktmusters angeglichen. Lediglich in der Einstellung des Radius der Punktbeugung sind Abweichungen vom Radius der Punktmusterbewegung festzustellen, diese Einstellung wird relativ zum Radius der Bewegung des Punktmusters Kompensationsamplitude genannt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Korngröße gleich heller homogen angeordneter Punktmuster auf die Einstellung der Kompensationsbewegung des Musterpunktes keinen Einfluss zu haben scheint. Die eingestellten Kompensationsamplituden sind

musterunabhängig und, relativ zur Amplitude des induzierenden Musters, nahezu identisch (Abb. 3.4 und 3.5).

Die Induktion der Scheinbewegung im unbewegten Punkt scheint in diesen Versuchen nicht musterabhängig differenzierbar zu sein. Eine Scheinbewegungsinduktion findet stets statt, die Versuchspersonen stellen relativ zur Amplitude des induzierenden Musters sehr ähnliche Kompensationsamplituden für den zunächst unbewegten, aber bewegt wahrgenommenen Punkt im Zentrum ein (0,88 +/- 0,06). Die Kompensationsbewegung des Punktes läuft in Phase (oder bei einer Person stets um π verschoben) und mit gleicher Geschwindigkeit mit der Induktionsbewegung des Punktmusters, hat aber eine geringere Amplitude. Alle Versuchspersonen berichteten, dass der zunächst unbewegte zentrale Punkt als „weiter entfernt“ als die Scheinbewegung induzierende Muster „im Vordergrund“ wahrgenommen wurde.

Auf das Phänomen der Einstellung einer Phasenverschiebung um π , das in diesem Versuch bei einer Versuchsperson auftrat, wird speziell in Versuch 3.1.2.1 näher eingegangen, eine mögliche Erklärung dieses Phänomens in der abschließenden Diskussion der Versuchsreihe 3.1 beschrieben.

3.1.2 Kompensationsbewegungsmessungen verschiedener Mustertypen

Nachdem zur Induktion der Scheinbewegung in Versuch 3.1.1 Punktmuster Verwendung fanden, die jeweils aus identisch großen Punkten in konzentrischen Kreisen bestanden (vergleiche Abb. 3.3), kamen in den folgenden Versuchen nach verschiedenen Gesichtspunkten veränderte Muster zum Einsatz, um eventuelle Unterschiede festzustellen.

3.1.2.1 Muster generiert nach exponentiellen Funktionen

Alle in diesem Versuch verwendeten Muster wurden nach der Funktion $f(x) = c x^y$, mit $y = (0,2; 0,3; \dots \text{bis } 1,2)$ generiert, wobei $f(x)$ der Musterpunktgröße in Abhängigkeit von der Entfernung vom Mittelpunkt (x) entspricht. Beispielhaft zeigt Abb. 3.7 diesen Funktionsverlauf für einzelne Punktmuster. Der Faktor c war nötig, um zu verhindern, dass die Punkte zu groß wurden und um eine annähernd einheitliche Flächenfüllung

zu ermöglichen. Diese lag bei allen Mustern in einem Bereich von 42 bis 43,5%. Alle zentralen Aussparungen wurden so gewählt, dass sie stets eine Größe in einem Bereich von 19° bis 22° Sehwinkel hatten. Die Anzahl der konzentrischen Kreisringe variierte bedingt durch die verwendete Funktion und möglichst konstante Flächenfüllung von maximal 20 Musterpunktkreisringen (Muster $y=0,2$) und minimal 8 Musterpunktkreisringen (Muster $y=1,2$).

Ein zusätzliches Muster wurde nach den gleichen Kriterien in Bezug auf Größe der zentralen Aussparung und Flächenfüllung nach der linearen Funktion $f(x) = c(x_{max} - x)$ mit x_{max} als dem größtmöglichen Wert der Entfernung vom Musterzentrum generiert, es wird im folgenden INV (oder „Invers“) genannt, hierbei sind die größten Musterpunkte im Zentrum zu finden und werden linear zum Rand hin kleiner. Exemplarisch für alle zwölf verwendeten Muster zeigt Abbildung 3.6 einige dieser Muster. Die Abhängigkeit der Musterpunktgrößen von der Entfernung vom Mustermittelpunkt und der jeweils verwendeten Funktion soll Abbildung 3.7 verdeutlichen.

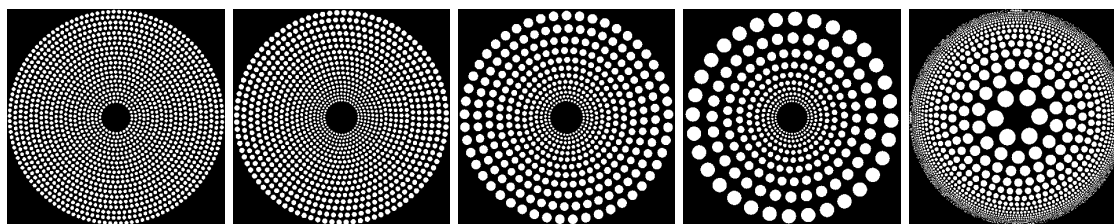


Abb. 3.6: Exemplarisch für die elf nach der Funktion $f(x) = c x^y$ generierten Muster sind hier die mit $y=0,2$; $y=0,5$; $y=0,8$; $y=1,1$, sowie ganz rechts das zwölfte, nach der Funktion $f(x) = c(x_{max} - x)$ generierte Muster INV dargestellt. Diese Punktmuster wurden in Versuch 3.1.2.1 verwendet. Die Flächenfüllung liegt bei allen Mustern zwischen 42 und 43,5% im gefüllten Bereich, die Größe der zentralen Aussparungen liegt in einem Durchmesserbereich von 19° bis 22° Sehwinkel.

Musterpunktgrößen bei unterschiedlichen Funktionen

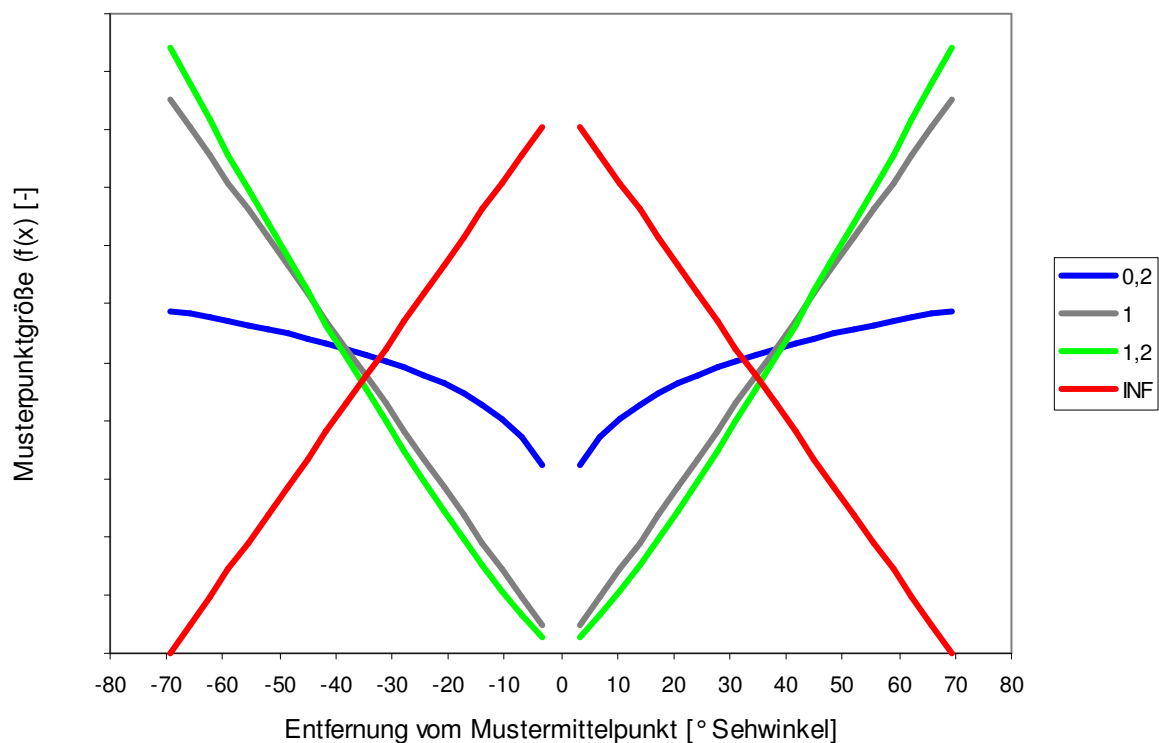


Abb 3.7: Die Grafik soll die Musterpunktgrößen in Abhängigkeit von der Entfernung vom Punktmusterzentrum und der verwendeten Funktion verdeutlichen. Entlang der x-Achse ist ansteigend die Entfernung vom Mittelpunkt des Punktmusters aufgetragen, die y-Achse zeigt zur Verdeutlichung dazu stark überzeichnet die Änderung des Durchmessers des betreffenden Musterpunkts. Exemplarisch sind die Muster mit $y=0,2$ (Abb. 3.6 ganz links) in blau, mit $y=1,0$ (entspricht einem streng linearen Anstieg, wie in Abb.3.11 Mitte rechts) in grau, mit $y=1,2$ (Abb. 3.6, zweites von rechts) in grün und das Muster INF (Abb. 3.6 rechts) in rot dargestellt.

Ergebnisse 3.1.2.1

Wie im Versuch 3.1.1 stellten drei der vier Versuchspersonen zur Minimierung der empfundenen Scheinbewegung eine Amplitude ein, die stets in einem Bereich von 80 bis 95% der Amplitude des Musters entsprach. Alle Versuchspersonen gaben an, dass der rote Punkt sich „hinter“ dem Punktmuster befand.

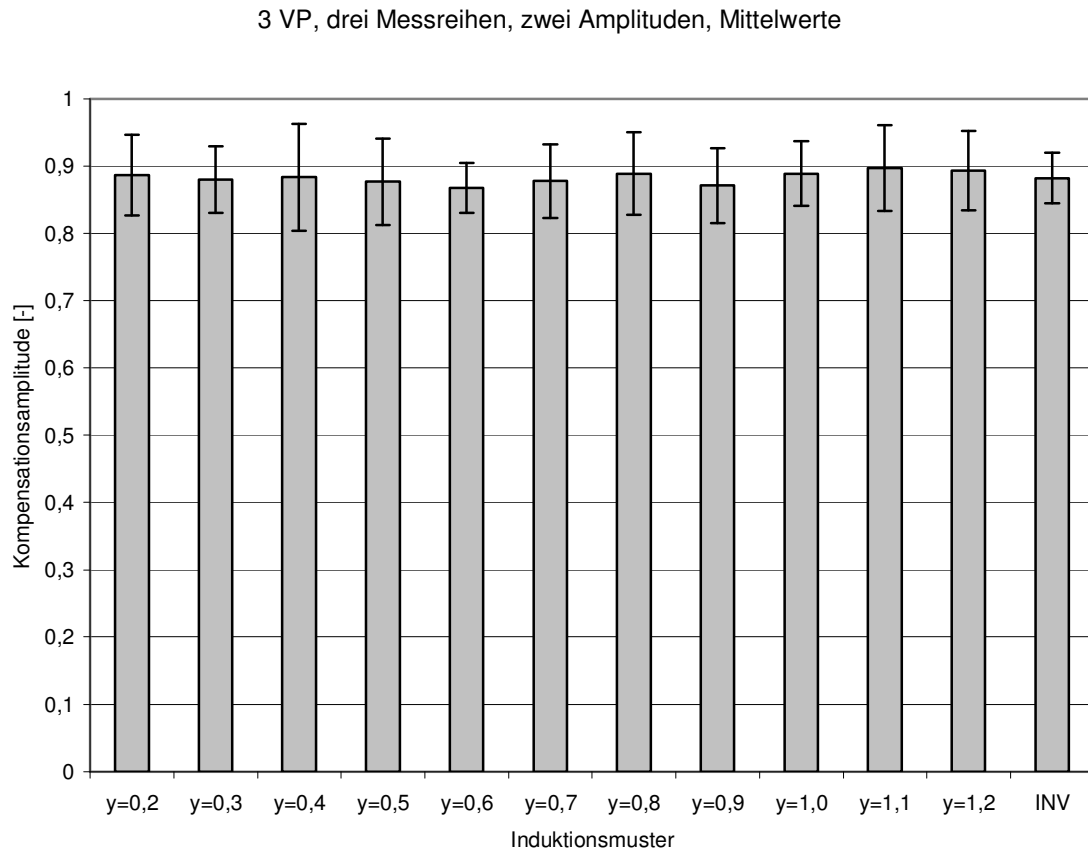


Abb. 3.8: Die Grafik zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Kompensationsamplituden in Versuch 3.1.2. Da mit zwei unterschiedlichen Musteramplituden gemessen wurde, ergeben sich pro Datenpunkt insgesamt 18 Messungen von drei Versuchspersonen. Die verwendeten Muster werden in Abb. 3.6 gezeigt.

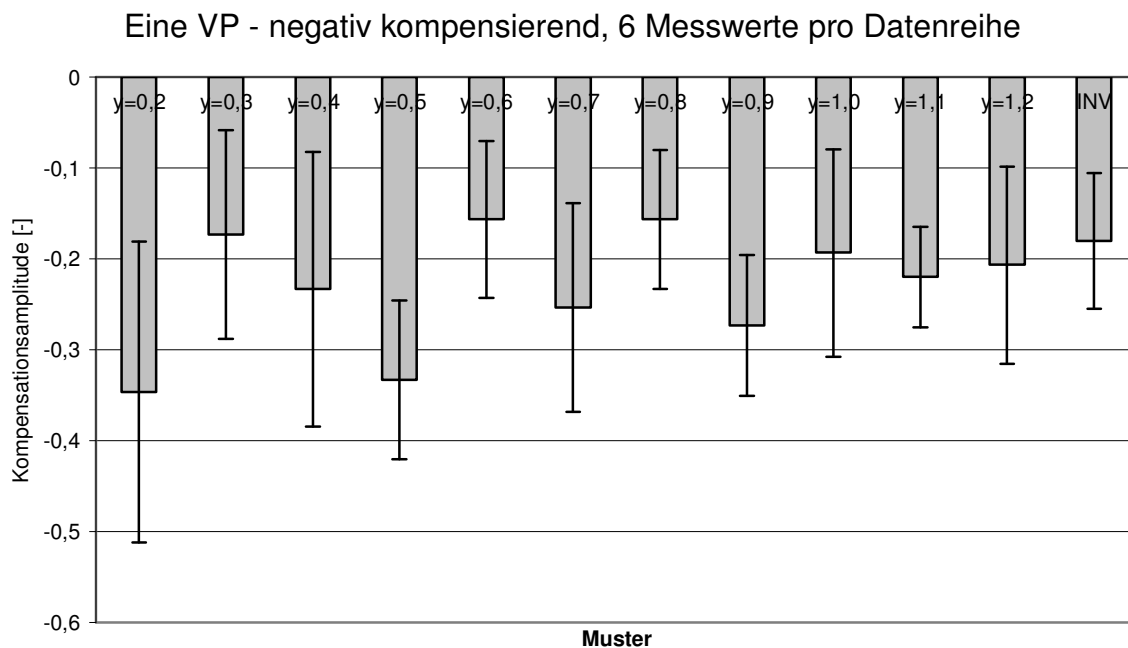


Abb. 3.9: Die Grafik zeigt beispielhaft die Einstellungen einer Versuchsperson im Versuch 3.1.2.1, die zur Minimierung der Bewegungswahrnehmung stets eine „negative“ Kompensationsamplitude wählte (vergleiche Abb. 3.2). Jeder Datenpunkt stellt hierbei nur 6 Messungen dar, was die recht hohen Abweichungen der einzelnen Werte zueinander und die recht hohen Standardabweichungen allerdings nur zum Teil erklären kann.

Alle Versuchspersonen gaben an, die induzierenden Punktmuster als ein einziges Objekt im Vordergrund über dem zentralen, zunächst unbewegten Punkt im Hintergrund wahrzunehmen. Hierbei spielte die Musterfunktion nur insofern eine Rolle, dass die Form dieses Objektes als unterschiedlich gewölbter „Trichter“ oder beim Muster INV quasi als „Käseglocke“ wahrgenommen wurde.

In den Versuchen 3.1.1 erschienen die induzierenden Punktmuster (aus gleich großen Punkten in konzentrischen Kreisen) hingegen als bewegte Flächen im „Vordergrund“. Um zu klären, ob die Art und räumliche Struktur des verwendeten Musters, die Form der zentralen freien Fläche oder speziell an bekannte Strukturen der Retina angepasste Muster von den Versuchspersonen anders kompensiert werden, wurde der folgende Versuch 3.1.2.2 durchgeführt.

Versuch 3.1.2.2

Im weiteren Verlauf wurden mit sechs normalsichtigen, stets positive Kompensationsamplituden einstellenden Versuchspersonen drei Messreihen mit jeweils zwei unterschiedlichen Musteramplituden durchgeführt.

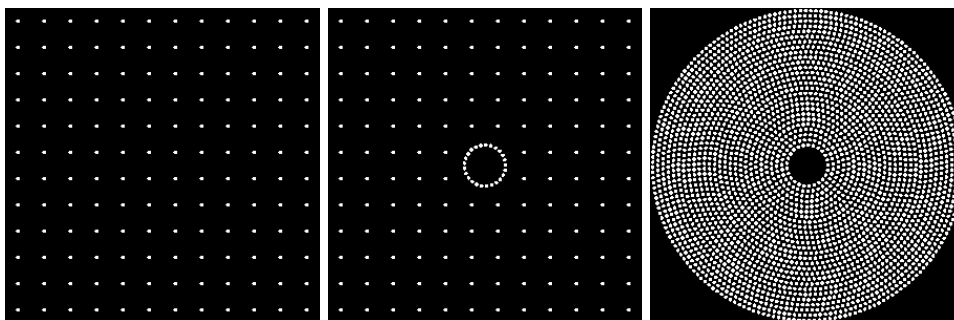


Abb. 3.10: Um zu klären, ob die bisherige Struktur der Muster einen erheblichen Einfluss auf die Einstellung der Kompensationsamplituden hatte, wurden der Versuch 3.1.2.2 mit den hier gezeigten Mustern „Cluster“ (links), „Cluster mit Kranz“ (mittig) und „30 Kreise Vergleich“ (rechts) durchgeführt. Die zentrale Aussparung betrug bei diesen Mustern etwa 18° Sehwinkel, in allen drei Mustern sind alle Musterpunkte $1,86^\circ$ Sehwinkel groß.

Abbildung 3.10 zeigt die im ersten Teil dieses Versuches verwendeten Muster. Die Muster „Cluster“ und „(Cluster mit) Kranz“ dienten dazu festzustellen, ob Form, Struktur und Art des Musters sowie die Art der zentralen Aussparung einen Effekt auf die Einstellung der Kompensationsamplitude des zunächst unbewegten zu induzierenden Punktes durch die Versuchspersonen hat. Eine gleiche Gesamthelligkeit konnte bedingt durch die völlige Verschiedenheit der Muster (siehe Abbildung 3.10) dabei nicht erreicht werden.

Das Muster „30 Kreise Vergleich“ (oder auch „30 Kr.-Vergl.“ genannt) entspricht dem homogenen Punktmuster mit $1,9^\circ$ großen Musterpunkten in konzentrischen Kreisen (siehe auch Abb. 3.3), um einen Vergleich in der Anordnung der Musterpunkte zu den beiden vorigen Mustern und den folgenden Mustern zu gewährleisten. Der Radius der Kreisbewegung betrug bei diesem Versuch einheitlich $5,2^\circ$ [Sehwinkel], die Mustergeschwindigkeit betrug daher stets $3,67^\circ$ Sehwinkel/s.

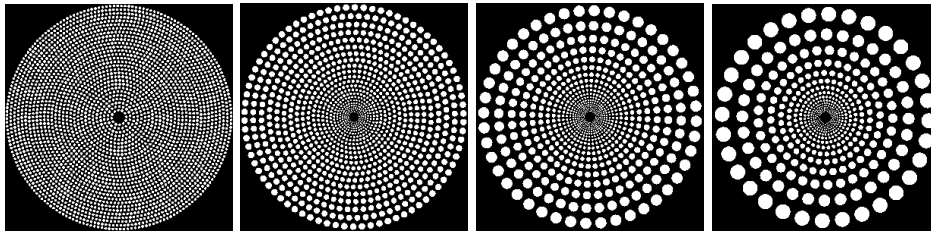


Abb. 3.11: Mit den hier gezeigten Mustern (von links nach rechts) „konstant 0“, „0,6“, „linear 1“ und „1,1“ soll festgestellt werden, ob eine spezifische Reizung bekannter Netzhautstrukturen bei den Versuchspersonen zu anderen Einstellungen der Kompensationsamplitude führt. Das Muster 0,6 (2. von links) und das Muster 1.1 sind dabei den retinalen dendritischen Feldgrößen der Y- bez. X-Zellen nachempfunden. Auch diese Muster wurden in Versuch 3.1.2.2 verwendet. Die Größe der zentralen Aussparung liegt bei allen Mustern um 8° Sehwinkel.

Abbildung 3.11 zeigt die im zweiten Versuchsteil verwendeten Punktmuster. Das Muster „konstant 0“ entspricht in Helligkeit und Größe der zentralen Aussparung den folgenden Mustern, allerdings verfügt es über eine konstante Musterpunktgröße von $1,9^\circ$ Sehwinkel. Das Muster „0,6“ variiert die Musterpunktgröße gemäß der Zunahme der dendritischen Feldgröße von Y-Zellen (*parasol ganglion cells*), entsprechend ist das Muster 1,1 der retinalen Feldgröße von X-Zellen (*midget ganglion cells*) angenähert (nach Dacey und Petersen, 1992). Das Muster „linear 1“ entspricht einer streng linearen Größenzunahme mit dem Abstand vom Mittelpunkt. Alle Muster wurden vorab mit Hilfe des Programms der Diplomarbeit des Autors (Hesse, 2002) erstellt und an den Betrachtungsabstand von 1,6 m sowie die Projektionsbreite so angepasst, das eine spezifische Reizung der Retina gemäß der gewünschten Funktion ermöglicht wurde. Der Radius der Kreisbewegung der Muster von Abb. 3.11 betrug jeweils konstant $2,6^\circ$ Sehwinkel, die Geschwindigkeit des Punktmusters daher $1,83^\circ$ Sehwinkel/s.

Ergebnisse 3.1.2.2

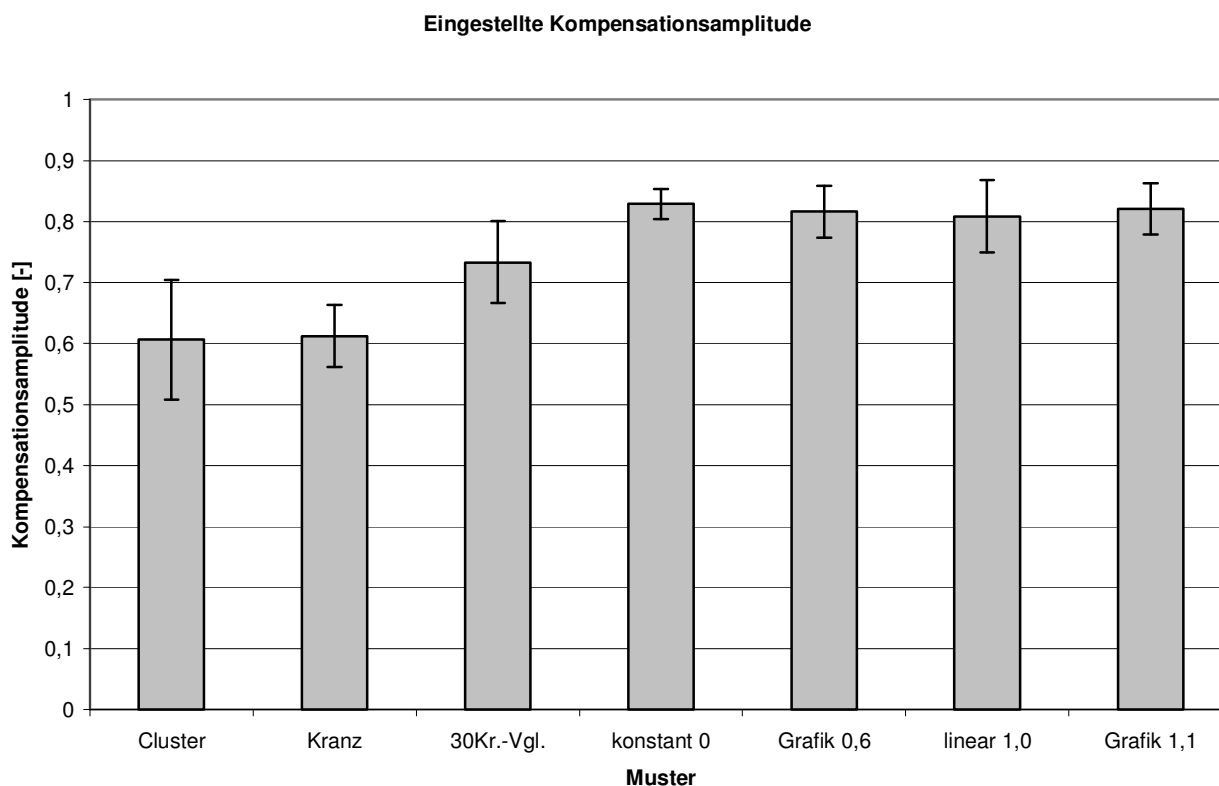


Abb. 3.12: Die Grafik zeigt auf der y-Achse die Einstellungen der Kompensationsamplitude des zunächst unbewegten Punktes der drei Punktmuster von Abb. 3.10 (links) sowie der vier Punktmuster aus Abb. 3.11 der sechs positive Kompensationsamplituden einstellenden Versuchspersonen. Jeder Balken entspricht bei jeweils drei Messungen 18 Einzelmessungen. Auffällig ist, dass die dunkleren Punktmuster von Abb. 3.10 (links, „Cluster“ und „(Cluster mit) Kranz“) mit wesentlich geringeren Amplituden kompensiert werden als die gleich hellen Muster von Abb. 3.11, die alle nahezu identisch kompensiert werden. Die Muster von Abb. 3.10 weisen die bisher höchsten Abweichungen in der Einstellung der Kompensationsbewegung der Versuchspersonen auf, haben jedoch auch die geringste Helligkeit. „Cluster“ erzeugt die geringste Kompensationsbewegung, „(Cluster mit) Kranz“ eine annähernd gleiche, „30 Kreise Vergleich“ eine etwas höhere.

Diskussion der Ergebnisse 3.1.2.2

Die Unterschiede in der Einstellung der Kompensationsbewegung in den Versuchen Muster „Cluster“, „Cluster mit Kranz“ und „30 Kreise Vergleich“ sind wahrscheinlich auf eine Zunahme der Gesamthelligkeit der Muster von „Cluster“ nach „30 Kreise Vergleich“ zurückzuführen. Eine größere Gesamthelligkeit führt scheinbar zu einer größeren Kompensationsbewegung, die Beschaffenheit und Art der zentralen

Aussparung (vergl. Muster Cluster, Muster Kranz) hat keinerlei Einfluss auf die Einstellung der relativen Kompensationsamplitude.

Eine direkte Abhängigkeit der eingestellten Kompensationsamplitude von der Größe der zentral ausgesparten Fläche selber oder der Anordnungsweise der Musterpunkte ist nicht ersichtlich. Die Abweichungen zwischen „30Kr-Vergl.“ und „konstant 0“ können durch die geringere Gesamthelligkeit des „30 Kr-Vergl.“-Musters durch die größere zentrale Aussparung erklärt werden.

Erstaunlicherweise ist auch bei den weiteren Versuchen keine spezielleusterspezifische Besonderheit erkennbar. Obwohl sich gerade die Muster „0,6“ und „1,1“ an der Größenzunahme mit steigender Exzentrizität auf der Retina der dendritischen Feldgröße der Y- („0,6“) und X-Ganglienzelltypen („1,1“) orientieren, führten auch diese Muster, also die indirekte spezielle Reizung einzelner Ganglienzellpopulationen, zu keinerlei abweichenden Messergebnissen.

Lediglich eine höhere Gesamthelligkeit des Musters bewirkte eine größere Einstellung der Kompensationsamplitude bei den Versuchspersonen (vergleiche die Muster aus Abb. 3.10 in der Abb. 3.12).

Diskussion aller Versuche 3.1

Unabdingbar für die Induktion einer Scheinbewegung des zentralen Punktes ist eine gleichmäßige Musterbewegung des induzierenden Musters, das als Ganzfeldreiz, also als Reiz entlang des gesamten bewusst wahrgenommenen Sehfeldes, gesehen werden muss.

Eine zu deutliche Abgrenzung der Projektionsfläche, sei es durch eine Kante mit hohem Kontrast durch einen weißen Hintergrund der Projektion oder eine feste Beschränkung des Sehfeldes durch eine das Sichtfeld begrenzende Schweißbrille kann den Eindruck eines Ganzfeldreizes und dadurch die Wahrnehmung der Scheinbewegung vollständig unterbinden.

Die Wahrnehmung der Scheinbewegung selber wird unwillkürlich induziert und lässt sich, sobald sie wahrgenommen wird, nicht mehr bewusst unterdrücken.

Die aus homogenen Kreisen gleich großer Punkte bestehenden Muster werden genau wie die nach exponentiellen Funktionen generierten Muster stets nahezu identisch „kompensiert“. Eine Abhängigkeit von der Funktion, nach der das Muster generiert wurde, ist in keinem Versuch zu erkennen. Ebenso scheint die Größe der Musteramplitude und der daraus resultierenden Geschwindigkeit keine Rolle für die Einstellung der kompensierenden Bewegung zu spielen (siehe auch die Abbildungen 3.4 und 3.5).

Selbst die Muster, deren Geometrie allen bekannten retinalen Strukturen völlig entgegengesetzt aufgebaut sind, wie die Muster „INV“ (Abb 3.6 rechts) und „Cluster“ sowie Cluster mit Kranz (Abb. 3.10), werden annähernd genauso kompensiert wie die Muster, die analog zu bekannten retinalen Strukturen aufgebaut sind, oder auch beliebige andere Muster.

Eine Abhängigkeit von der Geometrie des Musters in der Einstellung der Kompensationsbewegung des zunächst unbewegten Punktes ist in keinem Versuch nachweisbar.

Eine größere Einstellung der Kompensationsamplitude resultiert lediglich aus einer höheren Flächenfüllung des Punktmusters, die eine größere Gesamthelligkeit bewirkt (siehe auch Abb. 3.12, die beiden links gezeigten Messwerte entsprechen den Einstellungen bei den beiden Mustern mit wesentlich geringerer Helligkeit). Eine

größere zentrale Aussparung im induzierenden Muster führt zu einer deutlichen Abnahme der Gesamthelligkeit. Dies scheint aber nicht zu einer deutlich geringeren Kompensationsamplitude zu führen, da diese große Fläche scheinbar dem in der Wirkung entgegengesetzt ist (siehe Abb. 3.12, „30Kr.-Vergleich“ wird annähernd genauso kompensiert wie das Muster „konstant 0“, die sich nur in der Größe der zentralen Aussparung unterscheiden), da ein größeres „Objekt“ wahrgenommen wird. Die Form der zentralen Aussparung hat keinen Effekt auf die Einstellung der Kompensationsamplitude, was Abb.3.8 (Muster INV im Vergleich mit allen anderen Mustern) sowie Abb. 3.12 (Muster „(Cluster mit) Kranz“ und „Cluster“ im Vergleich) belegen.

Die konzentrischen kreisförmig bewegten Punktmuster werden von den Versuchspersonen außerdem stets als ein einziges bewegtes Objekt im „Vordergrund“ wahrgenommen. Muster mit konstanten Kreiskorngrößen (Versuch 3.1.1, Abb. 3.3) wurden dabei als „Ebene“, nach verschiedenen Funktionen generierte Muster mit zunehmend nach außen größeren Musterpunkten als „Trichter“ oder das Muster INV von Abb. 3.6 als „Käseglocke“ beschrieben. Der zentrale Punkt wurde stets als deutlich „hinter“ der Ebene des bewegten Muster liegend empfunden.

Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die gesamte Projektionsfläche nach der Einstellung der Kompensationsbewegung zur Minimierung der Scheinbewegung unbewusst nur noch als ein einziges bewegtes Objekt gesehen wird, das mit einem Spielzeugkreisel vergleichbar ist.

Dieser Spielzeugkreisel taumelt mit der Bewegung des Punktmusters um eine Achse. Der zentrale, zunächst unbewegte Punkt liegt nach der Einstellung der Kompensationsbewegung genau auf dieser Achse, was die Wahrnehmung von Bewegung insofern minimiert, als Punkt und bewegtes Muster zusammen nun als ein einziges räumliches Objekt wahrgenommen werden können. Die unterschiedlichen Geometrien der Muster (die als Ebene, gewölbt als Trichter oder als Käseglocke gesehen werden) spielen als Oberfläche dieses neuen Objektes für diese Art der Objektwahrnehmung keine Rolle mehr. Variationen in den Mustern werden scheinbar lediglich als nicht weiter zu spezifizierende Textur des neugebildeten Objektes selber gesehen.

Durch die zentrale Aussparung dieses „Kreisel“ können wir den darunter liegenden unbewegten Punkt erkennen, der als „weiter entfernt“ wahrgenommen wird, weil er kleiner und dunkler als das Objekt im „Vordergrund“ ist. Zusätzlich zur Bewegung ist also Scheintiefe induziert worden.

Um die Bewegungswahrnehmung dieses „weiter entfernten“ Punktes zu minimieren, also den Kreisel für unsere Wahrnehmung „zusammensetzen“, wird seine Bewegung von jeder Versuchsperson einfach an die „Achse“ des im Vordergrund „taumelnden“ „Spielzeugkreisels“ angepasst – der Drehpunkt dieser Achse endet dabei entweder „sehr weit weg“, weit hinter dem unbewegten Punkt was zu der positiven Kompensationsamplitude (von 50 bis 95%) der Mehrheit der Versuchspersonen führte, oder der Kreisel taumelt wie kurz vor dem Umfallen um einen Punkt zwischen dem induzierenden Vordergrundmuster (also des Kreiselkörpers) und dem zunächst unbewegten Punkt im Hintergrund („negative“ Kompensationsamplitude von 15 bis 35%). Dabei wird die Kompensationsamplitude selber – ähnlich dem Strahlensatz – stets gemäß der Entfernung zwischen Vordergrundmuster, unbewegtem Punkt und Drehpunkt des Gesamtsystems eingestellt. Dieser Erklärungsansatz wird durch Abbildung 3.13 grafisch verdeutlicht. Diese Sichtweise erklärt auch die wesentlich größeren Streuungen und den kleineren Betrag bei der Einstellung der negativen Kompensationsamplitude, da man die scheinbar größere Entfernung, nach dem Weber-Gesetz, im Vergleich zu näheren nur ungenauer abschätzen kann.

Ist eine dieser beiden möglichen Sichtweisen einmal gewählt, ist also die Apperzeption, die Wahrnehmung eines zuvor unbekanntes Objektes, abgeschlossen, lässt sich diese Sichtweise nicht mehr unterbinden. Die Versuchsperson stellt stets die gleiche Bewegung ein, da sie die dargestellte Situation unbewusst wieder erkennt. Es findet also lediglich eine Perzeption statt, da das Objekt stets als solches wieder erkannt wird. Unbewusst wird von ihr dann sogar die Reaktion darauf automatisiert ausgeführt (ähnlich dem „Simon effect“: die räumliche Lokalisation eines Objektes kann von der Wahrnehmung nicht ignoriert werden, auch wenn sie dem Betrachter nicht mehr bewusst auffällt).

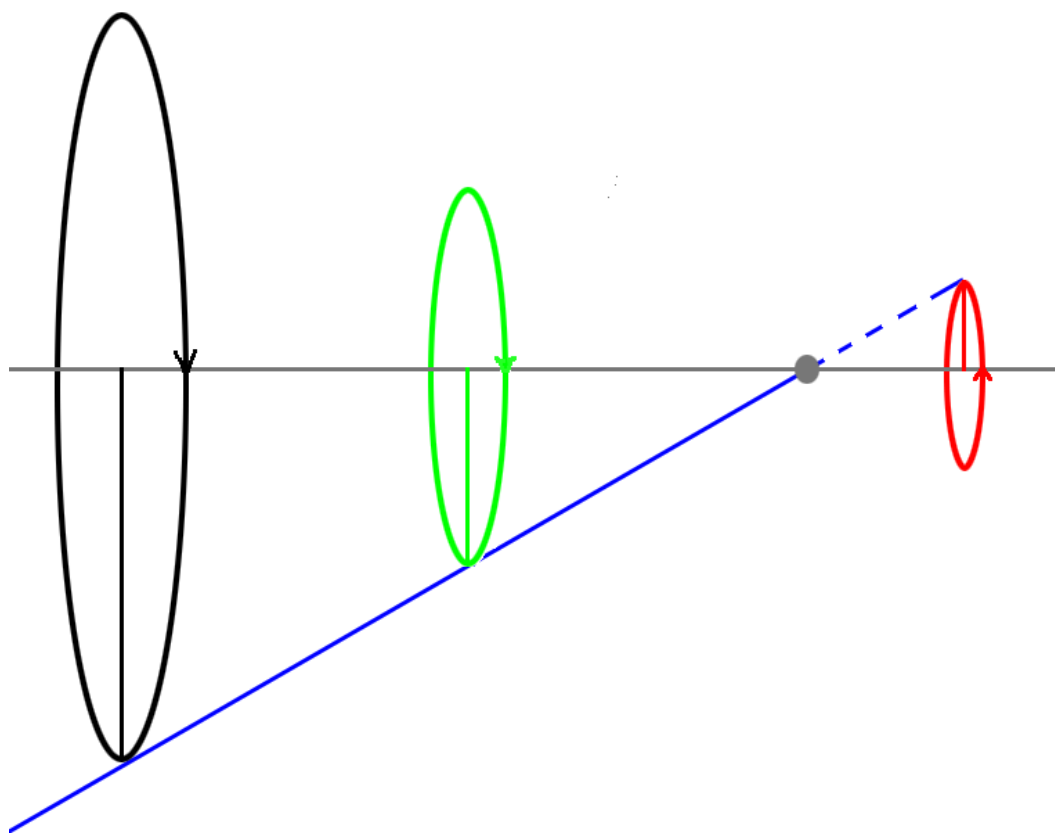


Abb.3.13: Verdeutlichung der gedanklichen Fusionierung des zunächst unbewegten Objektes mit dem Punktmuster, die vermutlich zu den identischen Einstellungen bei allen gleich hellen Punktmustern führte.

Der Betrachter schaut von links entlang der grauen Linie auf die Projektionsfläche, „in“ der er nun selber das hier von der Seite dargestellte räumliche Gebilde wahrnehmen kann (von vorne betrachtet erhält man in etwa Abb. 3.2). Der nicht sichtbare Mittelpunkt des bewegten Musters wird dabei stets als „im Vordergrund befindlich“ (schwarzer Kreis, links) wahrgenommen und bewegt sich auf einer Achse (blaue Linie) um den Drehpunkt (grauer Punkt) im Hintergrund. Der zunächst unbewegte Punkt befindet sich bei Versuchsbeginn im Drehpunkt im Hintergrund.

Der größte Teil der Versuchspersonen stellte nun dem unbewegten Punkt eine Bewegung in der Art und Weise ein, dass sich der Punkt auf einer etwas geringeren Auslenkung (grüner senkrechter Strich) relativ zum Radius des Punktmusters (schwarzer senkrechter Strich) bewegt. Jede Versuchsperson stellte dabei bei gleicher Gesamthelligkeit des Punktmusters eine annähernd identische Kompensationsbewegung ein, da sie mit Hilfe einer Achse (blaue Linie) gedanklich Vordergrundmuster und den zunächst unbewegten Punkt zu einem in sich bewegten Objekt fusionierte. Drei von etwa insgesamt 20 getesteten Versuchspersonen stellten jedoch eine negative Kompensationsamplitude (roter senkrechter Strich, mit einer Phasenverschiebung um π zur Musteramplitude, dem schwarzen senkrechten Strich) ein, da sie vermutlich den Musterpunkt gedanklich hinter den Drehpunkt des neu gebildeten Objektes schoben.

Wie aber ist eine solche Wahrnehmung zu erklären, wie sie bei diesen Versuchen auftrat? Bei nahezu allen untersuchten Wirbeltieren hängt eine Objekterkennung vom Erkennen von Kanten und räumlicher Tiefe ab. Ist eine solche Erkennung erfolgt, generiert das Gehirn auch Scheinkanten und Scheintiefe, um das einmal erkannte Objekt auch bei schlechterer oder unvollständiger Wahrnehmung weiterhin erkennen zu können.

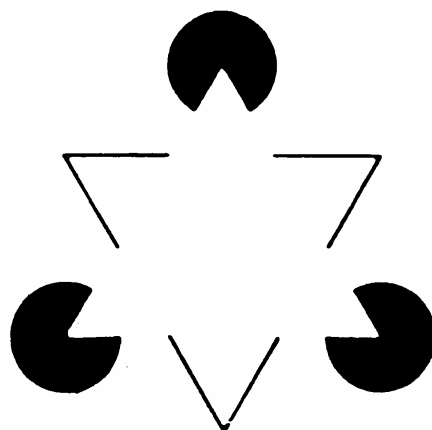


Abb. 3.14: Das Kanizsa-Dreieck

Ein Beispiel für eine derartige Scheinwahrnehmung ist auch das Kanizsa-Dreieck (Abb. 3.14). Hierbei sieht man ein „im Vordergrund“ befindliches, aus Scheinkonturen gebildetes Dreieck, dessen eine Spitze genau nach oben zeigt, und ein weiteres, ebenfalls aus Scheinkonturen gebildetes, „im Hintergrund“ befindliches Dreieck, dessen eine Spitze genau nach unten zeigt. Das im Vordergrund nicht verdeckte Scheinobjekt wird „modal“ erzeugt genannt, das im Hintergrund teilweise verdeckte Scheinobjekt „amodal“.

Obwohl es sich beim Kanizsa-Dreieck tatsächlich nur um drei Winkel und drei Kreissegmente handelt, die auf einer Ebene gruppiert sind, formt sich daraus in unserer Wahrnehmung ein leuchtend helles Dreieck im Vordergrund und ein weiteres, weiter entferntes dunkleres Dreieck im Hintergrund.

Die Wahrnehmung von Tiefe ist auch durch die Helligkeit des Objektes bedingt. So erscheint ein modales, das heißt ein im Vordergrund befindliches verdeckendes Scheinobjekt, das aus Scheinkanten generiert wird, stets heller als das umgebene Papier, ein amodales, also im Hintergrund befindliches und teilweise verdecktes, stets dunkler (siehe die „Dreiecke“ in Abb 3.14). Diese Unterteilung in Vorder- und

Hintergrund führt also nicht nur zu Größentäuschungen (Rock und Anson, 1979), also zur unterschiedlichen Größenwahrnehmung eigentlich identischer Objekte, sondern auch zu Helligkeitstäuschungen, da im Vordergrund befindliche Objekte als heller, im Hintergrund befindliche als dunkler wahrgenommen werden, auch wenn es sich lediglich um Scheintiefe handelt (Coren, 1972).

Dieser Effekt, dass hellere große Objekte im Vordergrund, dunklere kleinere im Hintergrund gesehen werden, ist zum Teil auch verantwortlich für das Entstehen der Größentäuschung bei der Wahrnehmung des Mondes, der „moon illusion“, bei der der Mond am Horizont größer als am Zenith stehend (Kaufmann, 2000) wahrgenommen wird. Ein im Zenith stehender Mond erscheint näher, als ein am Horizont stehender Mond, dessen Größe dann relativ zu weit entfernten, großen Objekten als umso größer wahrgenommen wird.

Die perzeptive Objekterkennung geschieht überwiegend durch eine Kanten-erkennung mit Hilfe des Luminanzkontrastes, der schon auf der Retina von den Horizontalzellen verstärkt wird, wird aber wesentlich genauer durch das Miteinbeziehen von Bewegung, Muster, Farbe und Querdissipation (Rivest und Cavanagh, 1996). Werden jedoch Scheinobjekte gesehen, kann dies sogar bis zu V1 (Seghier, 2000) die stattfindende Kantenerkennung stark beeinflussen.

In den Versuchen 3.1 wurde nicht nur zunächst eine Scheinbewegung erzeugt, sondern durch die Anweisung diese zu minimieren die Versuchsperson dazu verleitet, trotz einer anders lautenden Arbeitsanweisung, nämlich die wahrgenommene Scheinbewegung im unbewegten Punkt zu minimieren, Muster und Punkt gedanklich zu fusionieren und so ein einziges, in sich minimal bewegtes räumliches Objekt zu generieren.

Die Verarbeitung von Bewegung und Position im Raum von Objekten (parietaler, dorsaler Verarbeitungsstrom der visuellen Information, über Hinterhaupt- und Scheitellappen) läuft neuroanatomisch streng getrennt von der Erkennung der Objekte selbst ab (temporaler, ventraler Verarbeitungsstrom über den Schläfenlappen) (Goodale, 1992). Dabei beeinflusst eine erfolgte Objekterkennung im temporalen Kortex (Seghier, 2000) die Informationsverarbeitung im primären

visuellen Kortex (V1) in so fern, als die Bewegung der zunächst unabhängigen Objekte (Muster, unbewegter Punkt) einem einzigen räumlich zusammenhängenden Objekt zugeordnet wird und damit dessen Textur, also das Muster selber, nicht weiter beachtet wird.

Dieser Versuch ist daher, sollte diese Hypothese zutreffend sein, mit keinem geometrisch differenzierten Muster in der Lage, die Größe dieser Scheinbewegungen abhängig vom verwendeten Muster als Maß für eine unterschiedliche Bewegungsempfindlichkeit der Retina zu nutzen.

3.2 Versuche mit kreisenden Bewegungen intakter Muster

Wenn auf eine zentrale Aussparung des Scheinbewegung induzierenden Musters verzichtet werden soll, kann kein unbewegtes kleines zentrales Objekt zur Induktion verwendet werden, sondern es müssen zwei Großfeldreize gegeneinander bewegt werden. Diese müssen jedoch in sehr vielen Parametern stark voneinander abweichen, also sich in Farbe, Helligkeit und Texturtyp unterscheiden, um getrennt von einander für die Versuchspersonen wahrnehmbar zu sein, was eine Voraussetzung für die Erzeugung von Scheinbewegungen ist.

Solche Versuche stellen die einzige Möglichkeit dar, vollständige Muster ohne zentrale Aussparungen zu verwenden, wie diese bei der Induktion der Scheinbewegung von unbewegten zentralen Punkten notwendig sind, um andere Wahrnehmungsphänomene zu verhindern.

3.2.1 Versuch: Intakte physiologisch angepasste vs. homogene Muster

In diesem Versuch werden verschiedene Vordergrundmuster vor einem unbewegten Hintergrundmuster bewegt. Die Versuchspersonen sollen dabei die Stärke der Scheinbewegungsinduktion im aufeinander folgenden Vergleichen bewerten. Die Versuchspersonen können dies mit den Urteilen „gleich gut“, „besser“ oder „schlechter“ tun.

Die für die Induktion der Scheinbewegung verwendeten Muster sind annähernd gleich hell. Verglichen werden zwei Muster mit jeweils gleich großen Musterpunkten, sowie zwei Muster, deren Musterpunktgröße in der Exzentrizität vom Zentrum aus der von Dacey und Petersen (1992) ermittelten dendritischen Feldgröße von Midget-(X-Zellen) und von Parasolzellen (Y- oder Schirmzellen) entspricht. Diese Muster zeigt Abbildung 3.13.

Um eine deutliche Differenzierbarkeit des Hintergrundmusters vom Vordergrundmuster zu gewährleisten, wurde ein einheitliches Muster vertikaler und horizontaler Linien jeweils gleichen Abstandes mit einer Linienstärke von $0,11^\circ$ Sehwinkel und einem Linienabstand von $10,27^\circ$ Sehwinkel verwendet, wie es Abbildung 3.14 zeigt.

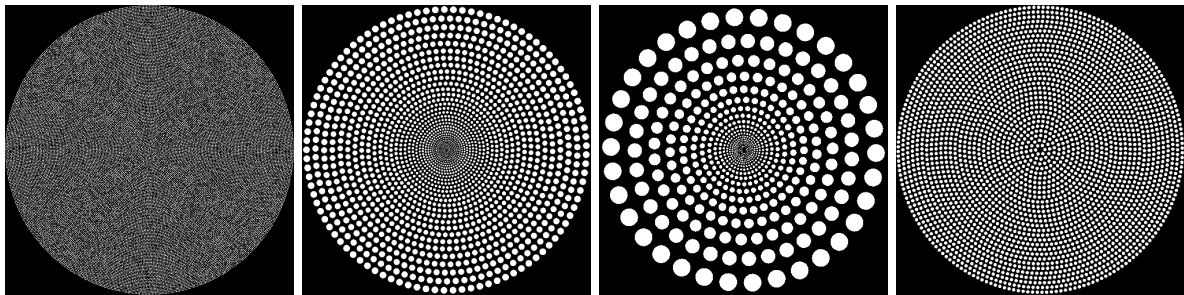


Abb 3.13: Die Punktmuster zur Induktion von Scheinbewegung des Hintergrundrasters (Abb 3.14) „100 Kreisringe“, „Parasol“, „Midget“ und „30 Kreisringe“ die im Versuch 3.2.1 verwendet wurden. Die Flächenfüllung liegt bei allen Mustern zwischen 42 und 43,5%.



Abb. 3.14: Das Hintergrundmuster aus roten, quadratisch angeordneten Linien aus Versuch 3.2.1

Versuchsdurchführung

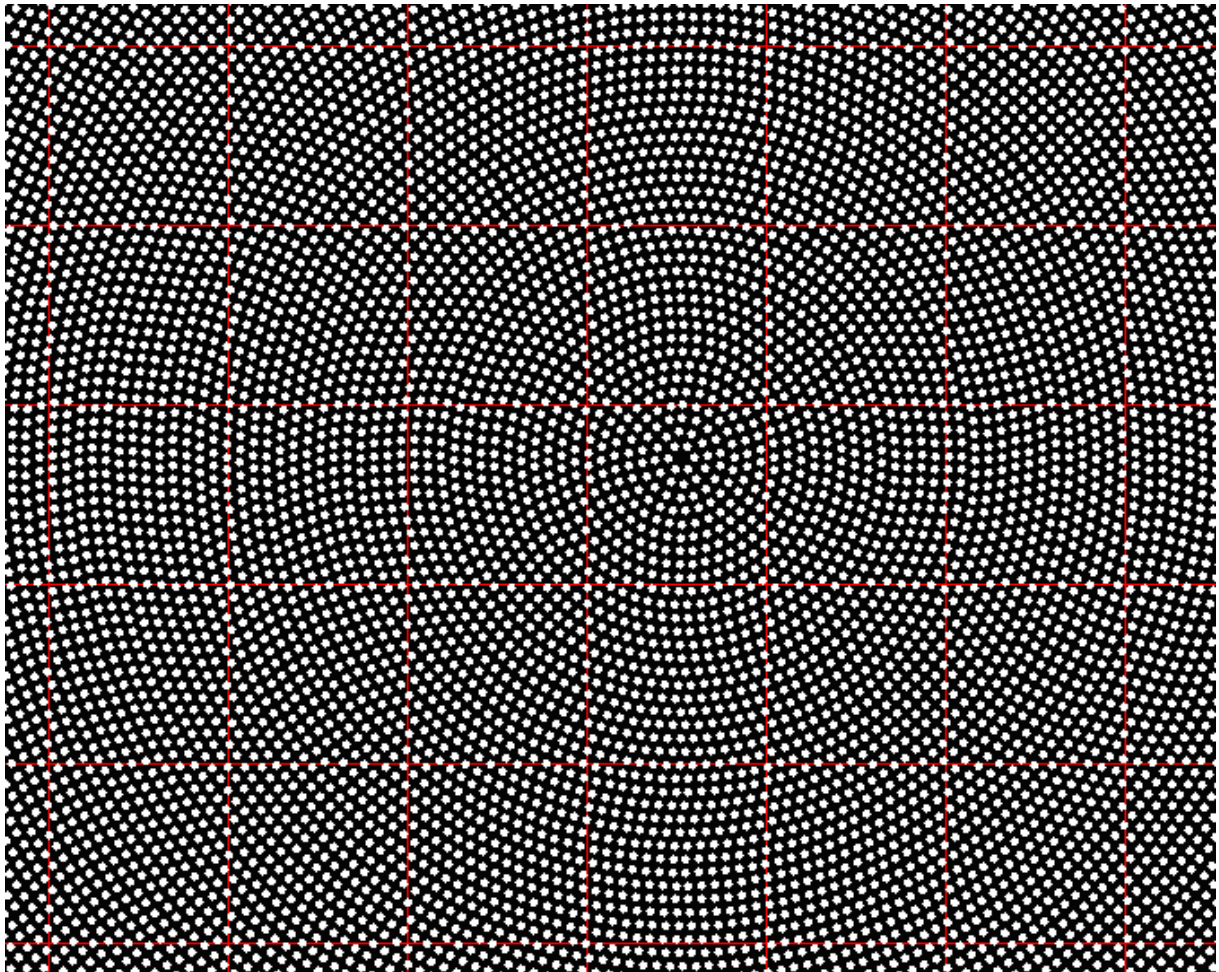


Abb. 3.15: Ansicht der Versuchsdurchführung des Versuches 3.2.1 mit dem bewegten weißen Vordergrundmuster „100 Kreisringe“ (Abb. 3.13) vor dem unbewegten Hintergrundmuster (Abb. 3.14).

Die Versuchsperson sollte das Zentrum des bewegten Vordergrundmusters fixieren und dabei zunächst beurteilen, ob eine Scheinbewegung des roten Hintergrundmusters erfolgte oder nicht. Sah sie eine Scheinbewegung, sollte die Stärke dieser wahrgenommenen Scheinbewegung mit einem zweiten, anschließend vorgeführten Muster verglichen werden. Die Muster wurden in variierender Reihenfolge miteinander verglichen, bis eine Reihenfolge nach Stärke der Scheinbewegungsinduktion feststand und die Ergebnisse reproduzierbar waren. Das am stärksten den Hintergrund induzierende Muster erhielt die Ziffer 4, das folgende 3, das drittstärkste 2 und das schwächste 1. Konnte die Versuchsperson bei einem Muster keine Scheinbewegung des Hintergrundmusters wahrnehmen, wurde eine 0

vergeben. Alle Muster waren in etwa gleich hell, da sie eine identische Flächenfüllung im Musterbereich von etwa 42% aufwiesen, was jedoch bei den Mustern, die mit zunehmender Exzentrizität vom Fixationspunkt gemäß bestimmter Funktionen angepasst sind, nicht exakt gewährleistet sein kann. Alle Muster wurden mit einer Geschwindigkeit von $1,83^\circ$ Sehwinkel/s ($T=9,85[s]$ mit einer Amplitude von $2,64^\circ$ Sehwinkel) kreisförmig bewegt. Der Versuch wurde mit neun Versuchspersonen durchgeführt.

Ergebnisse 3.2.1

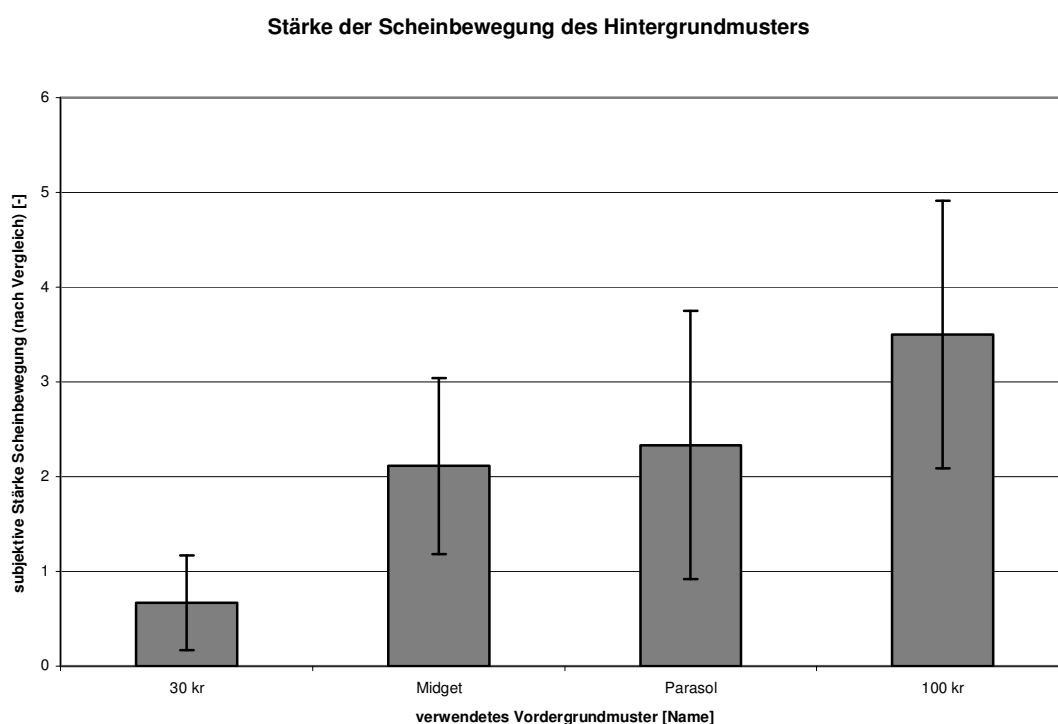


Abb. 3.16: Die Grafik zeigt die Ergebnisse der Bewertung der Induktionsstärke der Scheinbewegung nach der Bewertungsreihenfolge (0 keine Induktion, 1 schwächste,... 4 stärkste Induktion) im anschließenden Vergleich von neun verschiedenen Versuchspersonen. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen von diesen Bewertungen. Die Größe der Standardabweichungen lässt sich durch das Nichtfunktionieren der Induktionswahrnehmung bei einer Versuchsperson erklären.

Die Grafik 3.16 zeigt die subjektive Stärke der Scheinbewegung des Hintergrundmusters in Abhängigkeit vom induzierenden Vordergrundmuster. Die hohen Standardabweichungen sind durch das Nichtfunktionieren einer Induktion von Scheinbewegung in keinem Muster (=0) bei einzelnen Versuchspersonen erklärbar.

Die weitere Bewertung konnte lauten: 1=schlechteste Induktion, 2 = etwas bessere Induktion, 3=zweitstärkste Induktion und 4=beste Induktion.

Diskussion 3.2.1

Eine Objektwahrnehmung, also die Wahrnehmung des Punktmusters selbst als ein räumlich geformtes Objekt, wie dies in den Versuchen 3.1 auftrat, wurde bei diesen Mustern durch das Fehlen einer zentralen Aussparung und eines kleinen unbewegten Objektes scheinbar vollständig unterbunden.

Das geringfügig unterschiedliche Funktionieren des Musters „Parasol“ gegenüber dem Muster „Midget“ ist ein Hinweis auf die Abhängigkeit von der Mustergeometrie, die allerdings statistisch nicht sicherbar ist.

Kleine Musterpunkte („100 kr“) bewirken jedoch eine sehr starke, große Musterpunkte entweder eine geringere oder, bei einzelnen Versuchspersonen, keine Induktion der Scheinbewegung. Diese erheblichen Unterschiede zwischen diesen beiden Mustern sollten im folgenden Versuch die Abhängigkeit der subjektiven Stärke der Induktion feiner differenziert werden.

3.2.2 Versuch: Intakte transparente Muster, verschiedene homogene Muster in variablen Exzentrizitäten

Versuch 3.2.1 zeigte, dass eine genaue Differenzierung der Induktionswahrnehmung abhängig von retinalen Strukturen angepassten Punktmustern kaum möglich war. Deshalb sollte nun mit Hilfe sehr einfach gestalteter, aus nur zwei verschiedenen Musterpunktgrößen erstellte Punktmuster herausgefunden werden, ob eine Veränderung der Punktmustergröße abhängig von der Exzentrizität auf der Retina zu einer von der Versuchsperson unterscheidbaren Induktion von Scheinbewegung führt.

3.2.2.1. Vorversuch: Finden der optimalen Rasterung des Hintergrundmusters

Zunächst wurde in diesem Vorversuch festgestellt, ob der Abstand der Linien des Hintergrundmusters einen Effekt auf die Wahrnehmung der Scheinbewegung hat

oder nicht. In diesem Versuch konnte der Abstand der Linien zueinander beim Hintergrundmuster von $0,52^\circ$ bis $19,9^\circ$ Sehwinkel frei variiert werden.

Dieser Versuch wurde mit Vordergrundmustern aus jeweils gleich großen Punkten, die in konzentrischen Kreisen angeordnet waren, durchgeführt. Das eine Muster hatte eine Musterpunktgröße von $0,93^\circ$ Sehwinkel, das andere eine Punktgröße von $1,86^\circ$ Sehwinkel (siehe Abb. 3.17, außen links und außen rechts). Beide Muster hatten eine identische relative Flächenfüllung und wurden mit einer Amplitude von $2,6^\circ$ Sehwinkel mit einer Umlaufgeschwindigkeit von $1,83 [^\circ \text{ Sehwinkel/s}]$ kreisförmig über dem variablen Hintergrundmuster bewegt.

Zunächst wurde die für die Induktion von Scheinbewegungen optimale Größe des Hintergrundmusters ermittelt. Dazu wurde den Versuchspersonen jeweils ein Versuchsmuster mit einem Hintergrundmuster mit variierendem Linienabstand präsentiert (s. Abb. 3.18). Eine zunächst im Programm integrierte konstante Gesamthelligkeit des Hintergrundmusters, die durch ein Verringern der Musterhelligkeit nach der Eichkurve (vergleiche Material- und Methodenteil) des Videoprojektors bei kleinerem Linienabstand implementiert war, musste zugunsten einer besseren Wahrnehmbarkeit des Hintergrundmusters aufgegeben werden. Wurde die Helligkeit des Hintergrundmusters zu gering, konnte weder das Muster selber noch eine Scheinbewegung wahrgenommen werden.

Der Versuch wurde mit 4 Versuchspersonen durchgeführt. Die Versuchspersonen sollten dabei bestimmen, ab welcher Größe des Hintergrundrasters sie eine Bewegung dieses Rasters wahrnehmen konnten, wann sie deutlich wahrnehmbar wurde, wieder schlechter und schließlich wieder verschwand.

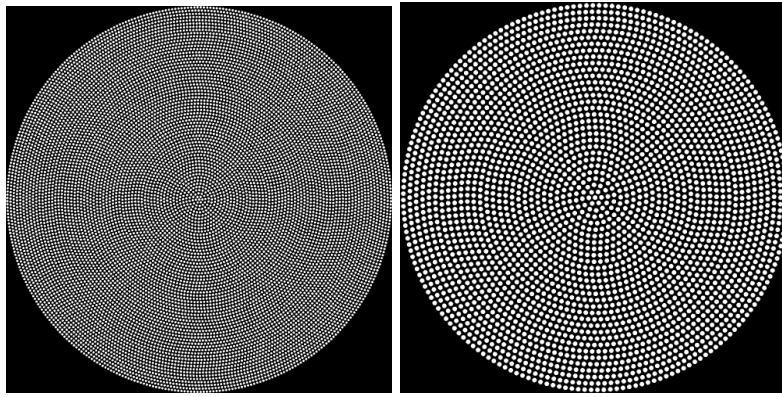
Abb. 3.17: Versuchsmuster mit $0,93^\circ$ und $1,86^\circ$ großen Musterpunkten

Abb 3.18: Das variabel große Hintergrundmuster

Ergebnisse 3.2.2.1:

Es zeigte sich, dass es sowohl ein Minimum als auch ein Maximum des Linienabstands im Hintergrundmuster für die Induktion von Scheinbewegungen gibt. Außerdem kann man hierbei Abhängigkeiten vom verwendeten Vordergrundmuster erkennen. Das aus kleineren Punkten bestehende Muster induziert im Gegensatz zu dem aus größeren bereits bei kleineren Linienabständen eine Scheinbewegung. Diese wird bei Zunahme des Linienabstands schneller, bleibt länger optimal sichtbar und verschwindet schließlich nur bei einer der vier Versuchspersonen über den Messbereich. Abbildung 3.19 zeigt die Ergebnisse genauer.

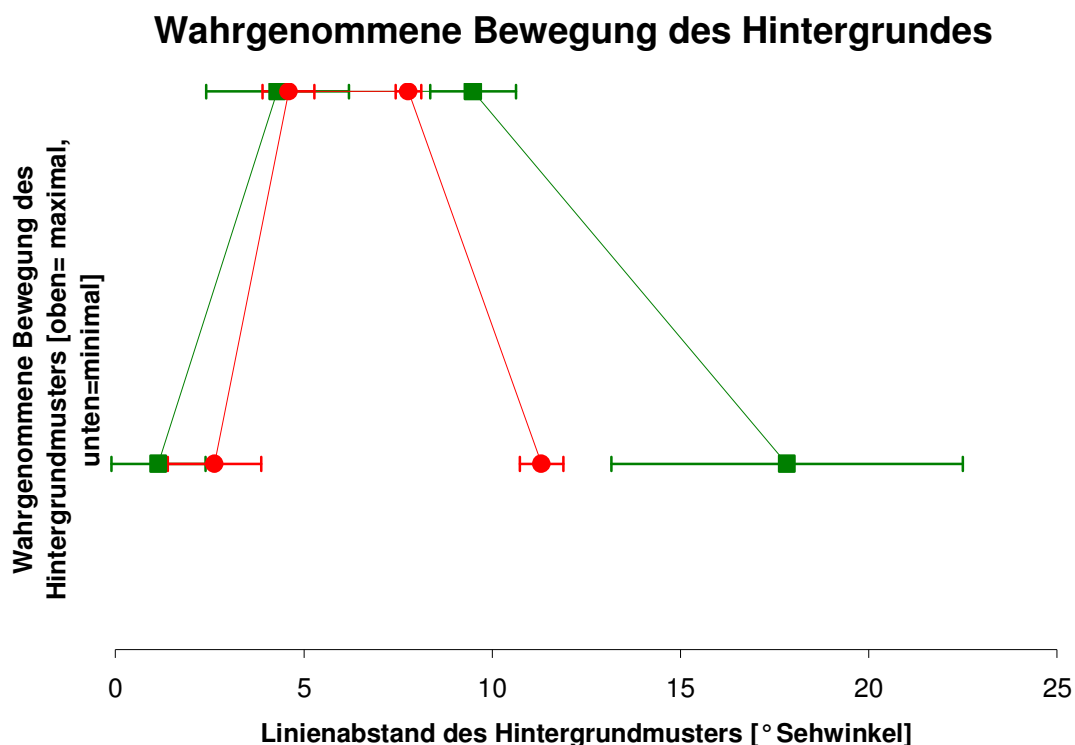


Abb. 3.19: Die Grafik 3.19 zeigt die Stärke der wahrgenommenen Scheinbewegung abhängig von dem Linienabstand im Hintergrundmuster. Die einzelnen Punkte stellen dabei die Mittelwerte der Einstellungen von vier Versuchspersonen dar, die Fehlerbalken die Standardabweichungen. Die grünen Punkte zeigen die Einstellung der Versuchspersonen bei dem Vordergrundmuster aus kleineren Musterpunkten ($0,93^\circ$), die roten die mit dem aus größeren ($1,86^\circ$) bestehenden. Jeder Datenpunkt entspricht vier Messungen.

Zunächst wurde festgestellt, bei welchem Linienabstand des Hintergrundmusters eine Scheinbewegung des Hintergrundmusters für die Versuchsperson wahrnehmbar wurde (Punkte links unten in der Grafik), von wann bis wann die Scheinbewegung optimal wahrgenommen werden konnte (jeweils die obere Gerade) und bei welchem Linienabstand des Hintergrundmusters diese Scheinbewegung wieder verschwand (Punkt unten rechts). Dies wurde jeweils für beide Muster ermittelt.

Die hohe Standardabweichung des „Bewegungsendes“ des Musters mit den kleineren Musterpunkten (Punkt rechts unten, grün) ist darauf zurückzuführen, dass nur eine einzige Versuchsperson ein Ende einer Scheinbewegung innerhalb des Messbereiches der einstellbaren Hintergrundmusterabstände ($0,52^\circ$ bis $19,9^\circ$) feststellen konnte. Bei allen anderen war die Induktion bis zur maximal einstellbaren Mustergröße wahrnehmbar.

Diskussion der Ergebnisse 3.2.2.1

Das Beginnen der Bewegung bei feinen Musterabständen hängt mit der Punktmustergröße des induzierenden Vordergrundmusters zusammen. Sind die Musterpunkte etwa genau so groß wie der Linienabstand des Hintergrundmusters, ist keine Bewegungsinduktion feststellbar. Dies lässt sich einerseits mit dem schon in Versuch 3.1 beschriebenen Treppenstufeneffekt (Anstis, 2004) erklären, andererseits treten durch die etwa gleich großen Abstände zwischen den Linien des Hintergrundmusters und den Punkten des Vordergrundmusters auch Moire-Effekte auf, welche die getrennte Wahrnehmung von Vorder- und Hintergrundmuster und damit auch einer Scheinbewegung verhindern.

Die Messungen zeigen Optima in der Wahrnehmung der Scheinbewegung abhängig vom verwendeten Muster. $6,3^\circ$ Sehwinkel Linienabstand sind im Mittelwert optimal bei $1,86^\circ$ großen Musterpunkten (rot), $7,3^\circ$ bei Musterpunkten von $0,93^\circ$ (grün). Weitere Versuche werden nur mit einem Linienabstand von $6,72^\circ$ durchgeführt, dem Mittelwert, bei dem die Scheinbewegung des Hintergrundmusters bei beiden induzierenden Punktmustern jeweils optimal wahrnehmbar ist.

3.2.2.2 Versuch: Vergleich der geometrisch variierten Muster untereinander

Die folgenden Untersuchungen wurden mit dem im vorausgehenden Versuch als optimal ermittelten einheitlichen Linienabstandes des Hintergrundmusters von $6,72^\circ$ Sehwinkel durchgeführt. Die Versuchsmuster wurden aus den beiden zuvor verwendeten Punktmustern folgendermaßen erstellt:

Zentral wurden in beiden Mustern aus Versuch 3.2.1 (siehe Abb. 3.17, links und rechts) verschieden große zentrale kreisförmige Aussparungen gemacht und mit dem jeweils anderen Muster die zentrale Fläche gefüllt. Die genauen Größen der Aussparungen sind in der Tabelle 3.20 dargestellt. Das Muster 0,93_6 besteht also bis zu einer Exzentrizität von $\pm 15,2^\circ$ zentral aus dem Muster mit $0,93^\circ$ großen Musterpunkten, außerhalb der kreisförmigen, zentralen Präsentationsfläche von $30,3^\circ$ Durchmesser aus konzentrischen Musterpunktkreisen von $1,86^\circ$ Sehwinkel. Stellvertretend für die derart aus den Punktmustern von Abbildung 3.17 erstellten Muster zeigt Abb. 3.21 das Muster 1,86_6.

Mustername (x =Punktgröße in der zentralen Fläche)	Durchmesser der zentralen Fläche [$^\circ$ Sehwinkel]
Muster x_1	$8,0^\circ$
Muster x_2	$12,9^\circ$
Muster x_3	$17,7^\circ$
Muster x_4	$22,3^\circ$
Muster x_5	$26,6^\circ$
Muster x_6	$30,3^\circ$

Tabelle 3.20: In den beiden Punktmustern von Abb. 3.17 (links außen und rechts außen) wurden zentrale Aussparungen erzeugt, die mit dem jeweils anderen Muster gefüllt wurden. Die Tabelle zeigt die Durchmesser dieser zentralen Flächen. Benannt werden die Muster nach der Größe der Punkte in der zentralen Fläche (0,93 oder 1,86). Außerhalb dieser Fläche haben die Punkte die jeweils andere Größe. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 3.21, die das Muster 1,86_6 zeigt.

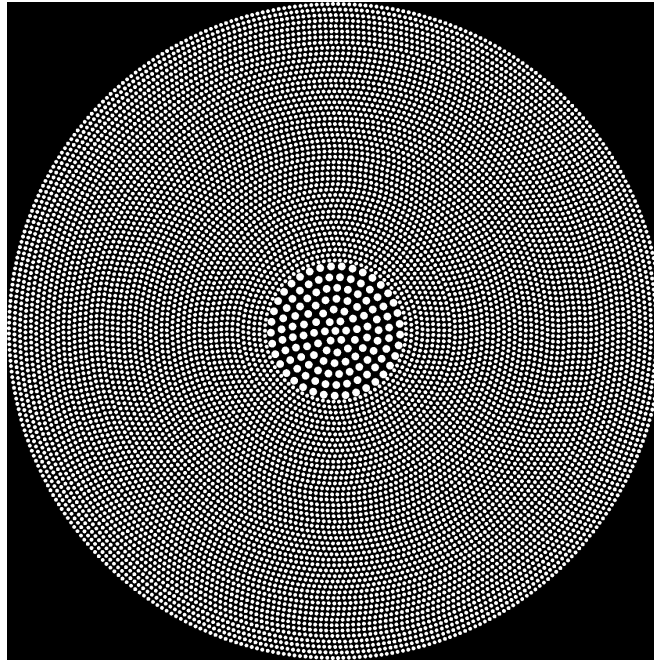


Abb. 3.21: Exemplarisch für die in Versuch 3.2.2.2 verwendeten Vordergrundmuster zur Induktion von Scheinbewegung ist hier das Muster 1,86_6 gezeigt. Dieses besteht im Zentrum aus einer kreisförmigen Fläche von $30,3^\circ$ Sehwinkel Durchmesser aus dem äußeren rechten Muster von 3.17 mit $1,86^\circ$ Sehwinkel großen Musterpunkten, jenseits davon aus dem äußeren linken Muster von Abb. 3.17 mit $0,93^\circ$ Sehwinkel großen Musterpunkten.

Da die Qualität der Scheinbewegung durch eine abwechselnde Projektion zweier Muster hintereinander stattfand, konnten so nur maximal vier Muster pro Versuchsreihe von jeweils einer Versuchsperson miteinander verglichen werden, um den Versuch in einem zeitlich vertretbaren Rahmen durchführen zu können. Daher wurden zunächst nur die Muster 1,86_6, 0,93_6, $1,86^\circ$ und $0,93^\circ$ präsentiert. In weiteren Messreihen wurden dann die Muster x_1, x_3 und x_5 und die Muster x_6/4 und x_4/2/1 miteinander verglichen, bis eine eindeutige Reihenfolge ermittelt werden konnte. Der Versuch wurde wegen des immensen Zeitaufwandes nur mit vier Versuchspersonen vollständig durchgeführt.

Ergebnis 3.2.2.2

Die Vergleichsmessungen mit den vier Versuchspersonen bestätigten eine deutliche identische Reihenfolge der Intensität der wahrgenommenen Scheinbewegung abhängig vom verwendeten Vordergrundmuster.

Zwischen sehr ähnlichen, benachbarten Mustern (z. B. 1,86_6 und 1,86_5 oder 0,93_2 und 0,93_3) konnte keine Versuchsperson im direkten Vergleich Unterschiede feststellen, das Induktionsereignis von Scheinbewegungen wurde dann stets als „gleich“ beschrieben.

Die genaue Reihenfolge der Induktion musste daher mit weiteren Vergleichen indirekt geklärt werden, in dem sich die zentrale Füllung der Muster um mehr als $3,7^\circ$ (bei x_5 und x_6) bez. $4,9^\circ$ Sehwinkel (bei x_1 und x_2) unterschied.

So wurden zum Beispiel für die Ermittlung der Induktionsstärke bei zentraler Füllung mit größeren Punkten erst 1,86_6 und 1,86_4, dann 1,86_5 und 1,86_3, dann 1,86_4 und 1,86_2 und schließlich 1,86_3 und 1,86_1 miteinander verglichen, wobei die Versuchspersonen diese unterschiedlicheren Muster differenzieren konnten.

Diese Bewertung bei Unterschieden der zentral gefüllten Fläche von $11,7^\circ$ (Muster x_1 und x_3) bis 8° Sehwinkel (x_4 und x_6) bereitete den Versuchspersonen keine Probleme, ebenso wenig wie die Differenzierung der Muster 1,86_1 und 0,93_1.

Lediglich eine Versuchsperson beurteilte das 0,93_1 (große Punkte im 8° großen Zentrum, also der rote, linke obere Punkt in Abb. 3.22) als am schlechtesten funktionierend, gab dabei aber stets an, das Hintergrundmuster selber nur bei diesem Vordergrundmuster nicht wahrzunehmen und damit auch keine Scheinbewegung wahrnehmen zu können. Sämtliche anderen von allen Versuchspersonen jeweils im direkten Vergleich ermittelten Ergebnisse waren bei allen drei Versuchspersonen identisch.

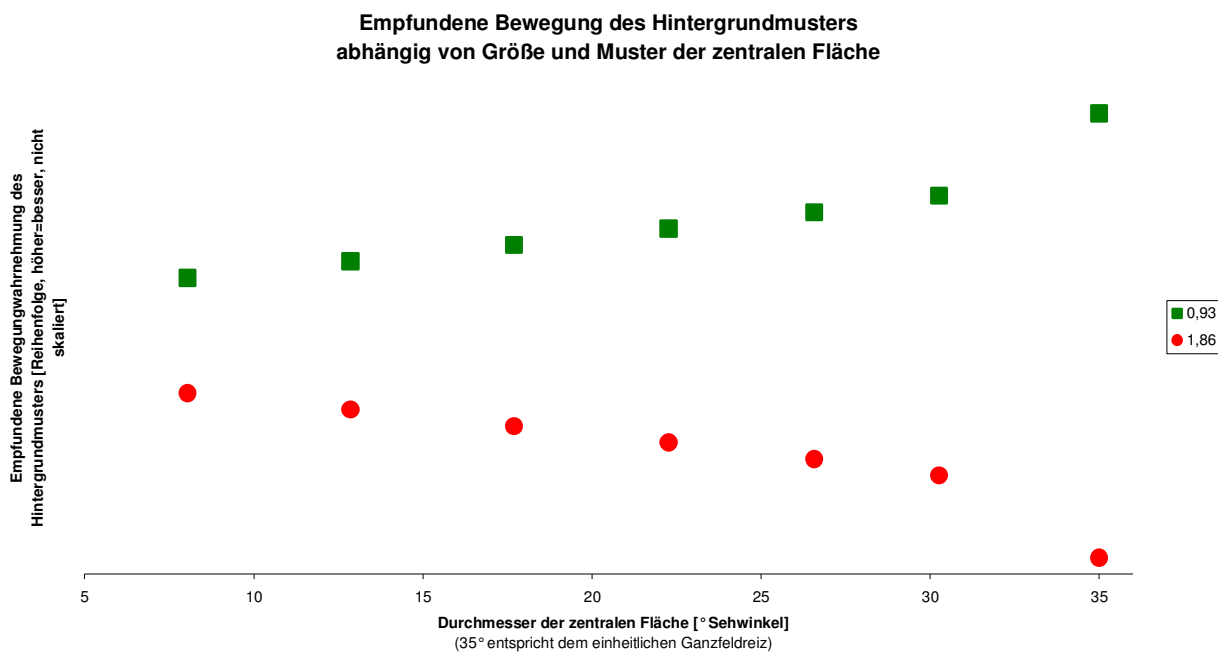


Abb. 3.22: Die Grafik zeigt die im Vergleich mit 3 Versuchspersonen in Versuch 3.2.2.2 ermittelte empfundene relative Bewegungsstärke der 14 verschiedenen Punktmuster. Die x-Achse gibt den Durchmesser der zentral gefüllten Fläche mit den jeweiligen Punkten gleicher Größe an. Die grünen eckigen Punkte repräsentieren dabei die zentrale Füllung mit den kleineren ($0,93^\circ$ Sehwinkel) Musterpunkten, die roten runden dementsprechend die mit den größeren ($1,86^\circ$ Sehwinkel) zentral gefüllten. Die beiden Punkte ganz rechts bei 35° repräsentieren die einheitlichen Muster aus Abb. 3.17 ($1,86$ und $0,93$). Zu beachten ist, dass es sich zum Großteil um eine indirekt ermittelte Reihenfolge handelt (siehe Ergebnisse 3.2.2.2), die y-Achse verfügt daher auch über keine Skalierung. Sehr gut von einander differenzieren ließen sich die Muster $0,93$ und $0,93_6$ (grüne Punkte rechts oben), $1,86$ und $1,86_6$ (rote Punkte rechts unten), $0,93_1$ und $1,86_1$ (roter und grüner Punkt links), was auch durch eine Vergrößerung der vertikalen Abstände in der Grafik angedeutet ist.

Die Abb. 3.22 zeigt die aus den Ergebnissen der Einzelversuche ermittelte Reihenfolge der wahrgenommenen Bewegung des Hintergrundmusters der vier Versuchspersonen. Eine Linearität der Bewegungsinduktionsstärke darf auf keinen Fall aus dieser Grafik entnommen werden! Tatsächlich waren sehr unterschiedliche Muster (wie auch $1,86_1$ und $0,93_1$) deutlich besser von einander differenzierbar als sehr ähnliche Muster (wie zum Beispiel $0,93_3$ und $0,93_4$), die sich nie direkt differenzieren ließen.

Diskussion 3.2.2.2

Die Reizung möglichst vieler dendritischer Felder mit Kanten von möglichst hohem Kontrast scheint für die Induktion von Scheinbewegungen förderlich zu sein. Daher bewirkt das nur aus kleineren Punkten bestehende Muster den besten, das nur aus größeren Punkten bestehende Muster den schlechtesten Induktionseffekt.

In der zentralen Retina, also in dem Bereich um die Fovea centralis, sind die meisten dendritischen Felder der Ganglienzellen der Retina. Genau in diesem Bereich funktioniert daher auch die Induktion der Scheinbewegungen mit dem Muster 0,93_1, das nur in diesem zentralen Bereich von etwa 4° Sehwinkel um das Zentrum der Fovea centralis herum kleinere Musterpunkte hat, wesentlich besser als mit dem Muster 1,86°_1, das zwar außerhalb dieser kleinen zentralen Fläche aus den kleineren Punkten besteht, zentral aber nur ein relativ grobes Punktmuster hat.

Da etwa die Hälfte aller Neurone von V1 nur die Signale der Ganglienzellen, deren dendritische Felder innerhalb der etwa $1,3^\circ$ Sehwinkel große Fovea liegen, auswertet, wird hierbei der Großteil aller Neurone des primären visuellen Kortex von dem jeweiligen Muster überstrichen.

Hierdurch lässt sich die Reihenfolge erklären. In der weiteren Peripherie werden relativ zum Zentrum weniger und größere Felder von den Musterpunktkanten überstrichen. Daher konnte der Effekt nicht von den Versuchspersonen auch bei recht großen Veränderungen des Durchmessers der zentralen Punktmusterfläche von $3,7^\circ$ bis $4,9^\circ$ Sehwinkel genauer differenziert werden. Mit der größeren Exzentrizität werden wesentlich weniger dendritische Felder von den Kanten der Musterpunkte überstrichen, als dies nahe am Zentrum der Fall gewesen wäre.

Erst unterschiedliche Punktmusterflächen mit einem unterschiedlichen Durchmesser der zentralen Fläche von mehr als 8° Sehwinkel Unterschied führen zu einer unterscheidbaren Qualität der wahrgenommenen Bewegungsinduktion.

Die ermittelte Reihenfolge lässt sich mit Hilfe dieser Betrachtung vollständig erklären.

Diskussion der Versuche 3.2

In diesen Versuchen gelingt den Versuchspersonen keine Fusion von Vordergrund- und Hintergrundmuster zu einem zusammenhängenden Objekt. Dennoch gibt es auch hier die Induktion von Scheintiefe. Das Raster im Hintergrund wurde auch hier als „weiter entfernt“ wahrgenommen. Beim Hintergrundmuster kann jedoch nicht mehr (was erprobt wurde) durch eine einzustellende Eigenbewegung die Scheinbewegung reduziert werden, wie dies in den Versuchen 3.1 gemacht wurde, da vermutlich eine gedankliche Fusionierung der in diesen Versuchen wahrgenommenen Ebenen nicht möglich ist. Dies verhindert eine quantitative Auswertung der Stärke der Scheinbewegungsinduktion durch unterschiedliche Vordergrundmuster. Allerdings lässt die subjektiv empfundene Stärke der Scheinbewegung im abwechselnden Vergleich Rückschlüsse auf die Musterwirksamkeit und damit die Stärke der Bewegungswahrnehmung zu.

Eine Abhängigkeit der subjektiv empfundenen Stärke der wahrgenommenen Scheinbewegung bei der Geometrie der Retina nachempfundenen Mustern, wie die Größenzunahme der dendritischen Feldgröße bekannter Ganglienzellpopulationen, führt zu keinem statistisch differenzierbaren unterschiedlichen Ergebnis (Versuch 3.2.1). Dies ist insofern verwunderlich, da gerade der vor allem durch die langsamen Bewegungen angesprochene magnozelluläre Kanal der Bewegungswahrnehmung seinen Input von den Y-Zellen erhält.

Wahrscheinlich lässt sich diese geringe Differenzierbarkeit der angepassten Versuchsmuster im Versuch 3.2.1 damit erklären, dass wenn durch einen angepassten Reiz der magnozelluläre Weg der Bewegungswahrnehmung durch das zur Induktion verwendete Muster speziell erregt wird, der eigentlich eher auf schnelle Bewegungen (Morand, 2000) spezialisierte, mit Hilfe der S-on-Ganglionzellen (Martin, 1997) innervierte koniozelluläre Weg ebenfalls gereizt wird. Diese möglicherweise Muster unabhängige Information geht direkt (Sincich, 2004) in das für Bewegungswahrnehmung zuständige Kortexareal und maskiert damit mögliche musterabhängige Unterschiede des magnozellulären Weges.

Die Stärke der Induktion der Scheinbewegungen scheint also in erster Linie von der Anzahl der detektierten bewegten Kanten im Sehfeld abzuhängen. Aber auch die Anzahl der die Kanten erkennenden Ganglienzellen scheint eine Rolle zu spielen. In

und um die Fovea sind die meisten Ganglienzellen vorhanden, mit zunehmender Exzentrizität werden deren dendritische Felder größer und es sind zahlenmäßig erheblich weniger.

Versuch 3.2.2.2 zeigt die besondere Bedeutung des zentralen Bereiches deutlich. Das Punktmuster aus kleineren Musterpunkten hat mehr bewegte Kanten. Ein zentraler Kreis von nur 8° Sehwinkel Durchmesser bestehend aus diesem feineren Punktmuster, umgeben von einem Großfeldreiz aus dem gröberen (0,93_1), bewirkt eine deutlich stärkere Induktion von Scheinbewegung im Hintergrundmuster, als das Muster, dessen zentraler kleiner Kreis aus dem gröberen Punktmuster umgeben von einem Ganzfeldreiz aus dem feineren Punktmuster (1,86_1) besteht.

Eine höhere Kantendichte im zentralen Bereich des Musters bewirkt eine stärkere Induktion der Scheinbewegung als eine höhere Kantendichte im vergleichsweise großen Ganzfeldreiz.

Je weiter sich dieser Unterschied im Muster räumlich von der Fovea entfernt, desto größer müssen die geometrischen Unterschiede des Musters sein. Muster, die im Durchmesser des anders gefüllten zentralen Kreises von nur $3,7$ bis $4,9^\circ$ Sehwinkel unterscheiden, können nicht in Bezug auf die Induktionsstärke im direkten Vergleich differenziert werden. Für eine solche Differenzierbarkeit sind geometrische Unterschiede des Durchmessers der zentralen Fläche von 8 bis $9,7^\circ$ Sehwinkel notwendig. Je mehr Kanten allerdings über das gesamte Sehfeld präsentiert werden, desto besser funktioniert diese Induktion.

Ohne das Vorhandensein eines Ganzfeldreizes findet jedoch keine Induktion von Scheinbewegungen im Hintergrundmuster statt. Für die Induktion der Scheinbewegungen im Hintergrundmuster muss also immer ein Input über die in der äußeren Peripherie der Retina zahlenmäßig stärker vertretenen Y-Zellen vorhanden sein. Die Stärke der Scheinbewegung selber wird über die ermittelte Kantendichte vor allem im eher zentralen Bereich stärker bewertet, in dem die X-Zellen überwiegen.

Dies ist ein deutlicher Hinweis, dass es eine einzige spezielle, für diesen Typ des Bewegungssehens spezifische geometrische Struktur im Sehsystem nicht gibt.

Es scheint stattdessen stets eine durch mindestens zwei bewegungsempfindliche Systeme verursachte systemimmanente Redundanz zu geben, trotz der Präferenz dieser einzelnen Systeme für bestimmte Bewegungsarten und -geschwindigkeiten.

Für die untersuchte Induktion von langsamen Scheinbewegungen deuten die Versuchsergebnisse darauf hin, dass der Input der Ganglienzellen des magnozellulären und auch des koniozellulären Systems für die Bewegungswahrnehmung stets gemeinsam quantitativ ausgewertet wird (Morand 2000), andere Forschungsergebnisse stützen den Befund. Für diesen Erklärungsansatz spricht die elektrophysiologisch und psychophysisch nachgewiesene Rolle des S-Zapfens auch bei langsameren Bewegungen (Ruppertsberg, 2003 und Vitten 2004).

Nur bei sehr gravierenden Reizunterschieden, die beide Bewegung detektierenden Systeme geometrisch ähnlich abweichend stimuliert, ist eine Differenzierung möglich. Bei der nahezu unterbundener Objekterkennung (Versuche 3.2) können daher unterschiedliche Bewertungen der Stärken der wahrgenommenen Scheinbewegung abgegeben werden. Eine übergeordnete Objekterkennung und räumliche Zuordnung dominiert jedoch stets beide Systeme (Versuche 3.1).

4 Induktion von Scheinbewegungen mit Hilfe horizontal bewegter Muster

Da die bisherigen Versuche mit kreisenden Bewegungen der induzierenden Punktmuster nicht geeignet waren, feinere Rückschlüsse auf die spezifische Geometrie der Retina bezüglich der Wahrnehmung von Bewegung zu ziehen, wurden nun Punktmuster verwendet, die mit horizontalen Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit bewegt wurden. Durch diese einfacheren Punktmuster sollte der Effekt dieser Scheinbewegungsinduktion durch psychophysische Schwellenmessungen genauer untersucht werden, um indirekt Rückschlüsse auf die retinale Geometrie des Bewegung detektierenden Systems ziehen zu können.

4.1 Induktion von Scheinbewegung mit Hilfe homogener Punktmuster

In diesen Versuchen wurden, nachdem bisher komplexe Versuchsmuster in kreisenden Bewegungen um einen zentralen Punkt (Versuche 3.1) oder ein anders aufgebautes Hintergrundmuster (Versuche 3.2) bewegt wurden, horizontal konstant bewegte einfachere Punktmuster für die Induktion von Scheinbewegungen in einem unbewegten Objekt verwendet.

Die Versuchsperson sollte dabei stets bestimmen, ab welcher Einstellung sie das zentrale Objekt als bewegt wahrnahm und bei welchen es unbewegt erschien. Um eine Schwellenmessung sinnvoll durchführen zu können, musste der Kontrast der Musterpunkte erheblich verringert werden und größere Musterpunkte verwendet werden, da das Auftreten von Scheinbewegungen bei hohem Kontrast sehr schnell und sehr stark auftrat.

Das bisherige Hauptproblem, die bei allen Versuchen mehr oder weniger stark auftretende Objekterkennung, die in höheren Kortexarealen stattfindet und auch die Wahrnehmungsleistung selber beeinflusst, blieb auch in diesen Versuchen bestehen, wurde aber bewusst in Kauf genommen.

Zufallsverteilte Muster (*random-dot patterns*) konnten nicht verwendet werden, da sie eine wahllose Objekterkennung verschiedenster Objekte diverser Größen und sogar die Wahrnehmung von Scheintiefe im Muster selber auslösen. Aus diesem Grund

wurden als Ganzfeldreiz möglichst regelmäßig angeordnete Punktmuster vom Computerprogramm in Echtzeit generiert.

Wolkenversuch

Das bewegte Muster besteht aus einem einheitlichen, grauen Punktmuster (s. Abb. 4.1). Alle Punkte sind in Rauten angeordnet. Die Punktgröße und der Punktabstand wurden gemeinsam so verändert, dass die Gesamtfläche der Füllung und damit auch Helligkeit der Präsentationsfläche in etwa gleich bleibt. Der Anteil der gefärbten Fläche betrug in diesem Versuch stets $100(\pi/64) = 4,9087\%$, die Leuchtdichte $13,2 \text{ cd/m}^2$ (mit schwarz bei $0,5 \text{ cd/m}^2$, also einem Kontrast von 1:27,4).

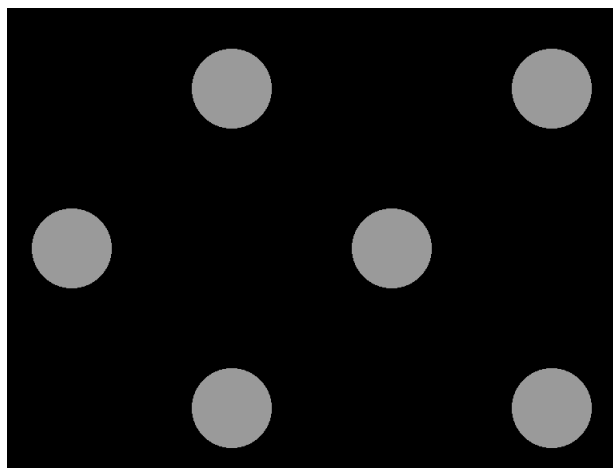


Abb. 4.1: Ausschnitt aus dem im Versuch 4.1 zur Induktion von Scheinbewegungen verwendeten Punktmuster. Es wurde horizontal mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Nach jeder Messung wurde die Bewegungsrichtung geändert. Um eine einheitliche Flächenfüllung zu gewährleisten, wurden Punktgröße und Abstände gemeinsam so verändert, dass die Punktmusterfläche in jedem Versuch gleich blieb.

Eine konstante Gesamthelligkeit ist für vergleichbare Ergebnisse unbedingt erforderlich, da die Induktion von Scheinbewegungen an sich stark von der Helligkeit abhängig ist.

Die Gesamthelligkeit des zentralen unbewegten Punktes wurde bei Vergrößerungen oder Verkleinerungen in allen Versuchen ebenso wie die des Musters konstant

gehalten, indem der größere Punkt dunkler, also mit geringerer Leuchtdichte, der kleinere heller, also mit höherer Leuchtdichte, dargestellt wurde (vergl. Abb. 4.2). Diese Anpassung der Leuchtdichte geschah nach der im Methodenteil dargestellten Eichfunktion des Videoprojektors (vergl. Abb. 2.2). Durch diese Maßnahme wurde der Kontrast des zentralen Punktes jedoch erheblich verändert. Die Gesamthelligkeit der Projektionsfläche blieb so bei jedem Versuch annähernd gleich.

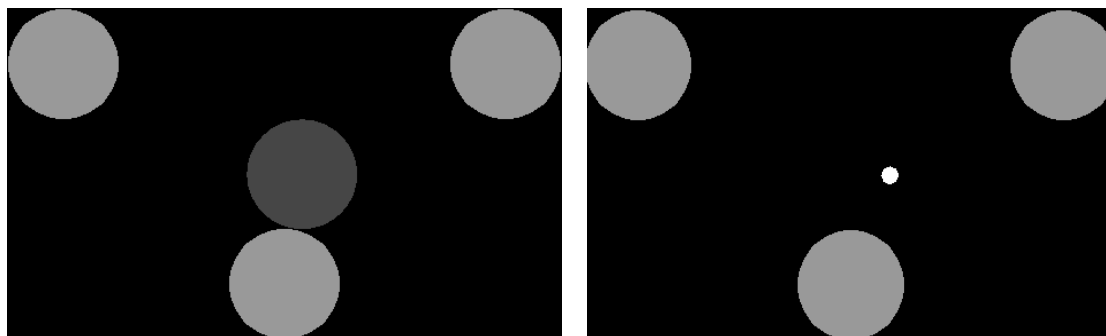


Abb. 4.2 Zentrale Ausschnitte der für die Versuchsperson sichtbaren Projektion in den Versuchen 4.1. Links ist ein großer, dunkler, rechts kleiner, hellerer zentraler Punkt sichtbar. Die Gesamthelligkeit beider Objekte ist durch eine Anpassung an die Eichkurve (Abb. 2.2) des Videoprojektors konstant.

Das Hintergrundmuster bewegte sich stets konstant mit einer (nach Vorversuchen ermittelten, unter den gegebenen Umständen für die lineare Bewegungsinduktion ideal geeigneten) Geschwindigkeit von $1,53\%/s$, der zentrale Punkt stand stets still und konnte auch nicht bewegt werden. Eine langsamere Geschwindigkeit würde zwar im Prinzip auch eine Bewegungsinduktion ermöglichen, allerdings ist das Pixelraster des Videoprojektors zu grob ($\sim 0,1^\circ$ Sehwinkel), da eine langsamere Bewegung automatisch zu einem wahrgenommenen „Ruckeln“ des Bildes beim Betrachter führt. Diese Geschwindigkeit (etwa 15 Pixel/s) wurde von allen Versuchspersonen stets als konstante, fließende Bewegung wahrgenommen. Wesentlich schnellere Bewegungen der Punktmuster führten ebenso zu einem Ruckeln, da die Rechenkapazität des PC einen schnelleren, konstanten Bildaufbau limitierte.

Auf der Leinwand wurden der Versuchsperson das bewegte Punktmuster und ein im Zentrum befindlicher, ruhender Punkt gezeigt. Gemessen wurde mit insgesamt elf normalsichtigen Versuchspersonen.

Nun wurden die Größen des zentralen Punktes und auch des Musters in diskreten Schritten variiert, wobei nach jeder Bewertung die Bewegungsrichtung des Musters geändert wurde, um eine Adaptation der Versuchsperson auf die Bewegung selber zu verhindern. Die Auswahl der Muster- und Punktgrößen und Ausgangshelligkeiten wurden anhand von Vorversuchen optimiert, wobei sowohl die Punkt- als auch die Mustergröße von $1,66^\circ$ bis $9,87^\circ$ in Schritten von zunächst (zentral) $2,08^\circ$ variiert wurden. Zusätzlich wurde bei fünf Versuchspersonen mit zentralen Punkten in der Größe von $0,21^\circ$ bis $0,83^\circ$ in Schritten von anfangs $0,208^\circ$ gemessen. Die einzelnen Größen sind den Grafiken Abb. 4.3 und Abb. 4.4 im Ergebnisteil 4.1 zu entnehmen. In der Natur hat der Mond am Himmel eine Größe von etwa $0,28^\circ$ Sehwinkel.

Die Versuchsperson gab nun an, ob sie beim Betrachten des zentralen Punktes den Eindruck gehabt habe, dass er sich bewege. War dies der Fall, wurde sie gefragt, ob sie sich „einreden“ könne, dass sich der zentrale Punkt nicht bewegte. Bemerkte die Versuchsperson hingegen keine Bewegung des zentralen Punktes, wurde sie anschließend gefragt, ob sie sich einreden könne, dass sich der Punkt doch bewegte.

So konnte ein Bewertungsschema der Induktion der Scheinbewegung definiert werden: keinerlei Bewegungsinduktion möglich (0), zunächst keine Bewegungsinduktion, dann jedoch Bewegung willentlich oder nach längerer Zeit (max. 30s) induzierbar (1), Bewegungsinduktion vorhanden, zentraler Punkt jedoch auch unbewegt wahrzunehmen (2), beziehungsweise immer nur bewegt wahrnehmbar (3).

Nachdem so der Induktionspunkt der Scheinbewegung dem Fixationspunkt entsprach, sollte nun in der Peripherie immer der horizontal dem Induktionspunkt entfernteste Musterpunkt fixiert werden. Der unbewegte Punkt befand sich so stets in einem Bereich von etwa 28° - 40° von der Fovea centralis entfernt, je nach Größe des bewegten Punktmusters und Dauer der Betrachtung. Diese Messung wurde sowohl für neu erscheinende Musterpunkte ebenso wie für das Sichtfeld verlassende Musterpunkte durchgeführt.

Ergebnisse des Wolkenversuches

Nur von den einzelnen Versuchspersonen reproduzierbare Bewertungen wurden berücksichtigt.

Die Versuchspersonen adaptierten auch an die präsentierte Bewegungsrichtung des horizontal bewegten Punktmusters, was auch den Wechsel der horizontalen Bewegungsrichtung nach jeder Messung erforderlich machte, da sonst bei den Versuchspersonen mit der Zeit eine analoge Bewegungsadaptation auftrat und so ein Bewegungsnacheffekt in nahezu beliebigen unbewegten Objekten eine Scheinbewegung induzierte.

Erst durch striktes Abwechseln der Bewegungsrichtung wird eine dauerhafte Adaptation an die präsentierte Bewegung effektiv verhindert (Hoffmann, 1999).

Alle Messungen der kleinen ($0,21^\circ$ - $0,83^\circ$) zentralen Punkte lösten bei allen Versuchspersonen eine nicht willentlich beendbare Bewegungsinduktion (entspricht Wert=3) aus, daher wird auf die Visualisierung und Darstellung dieser Daten verzichtet.

Die Bewegungsinduktion in Abhängigkeit von Muster- und Punktgröße war bei allen Versuchspersonen unterschiedlich, bei jeder einzelnen Person jedoch sehr exakt reproduzierbar. Eine Versuchsperson sah stets eine nicht beendbare Bewegungsinduktion und eine andere konnte keinerlei Scheinbewegungen wahrnehmen; auch diese Messwerte wurden nicht mit berücksichtigt.

Auch spielte bei der Fixation eines in der Peripherie gelegenen Musterpunktes keine Rolle, ob sich dieser Musterpunkt auf das unbewegte Objekt zu bewegte oder davon entfernte, weshalb auch dabei auf die differenzierte Visualisierung dieser Einzelergebnisse verzichtet und nur das Gesamtergebnis mit doppelter Datenmenge in Abb. 4.4 gezeigt wird.

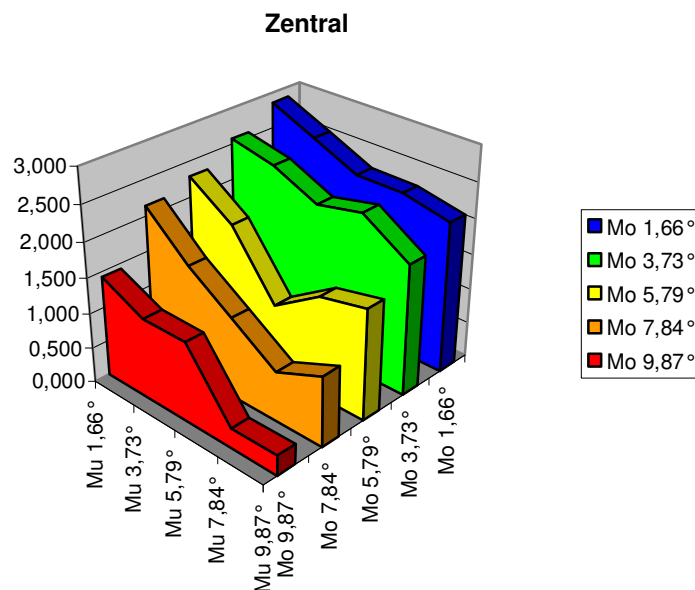


Abb. 4.3: Wahrgenommene Bewegungsinduktion von neun Versuchspersonen beim Betrachten des zentralen Punktes. Die Grafik zeigt die Mittelwerte der Bewertungen der Scheinbewegung beim Betrachten des zentralen Punktes. Die Werte an der x-Achse („Mu“ für Muster) geben die Größe der vorbeiziehenden Musterpunkte in Grad Sehwinkel an, analog dazu ist auf der y-Achse die jeweilige Größe des zentralen Punktes angegeben („Mo“ für Mond). Auf der z-Achse sind die Mittelwerte der Bewertungen der Bewegungswahrnehmung des zentralen Punktes angegeben. Der Wert „0“ steht für keine Bewegungswahrnehmung, „1“ für eine schwache, bewusst wahrnehmbare, „2“ für eine stärkere, bewusst allerdings noch unterdrückbare und „3“ für eine sehr starke, nicht unterdrückbare. Der Kontrast zwischen Muster und Hintergrund betrug einheitlich 1:27,4, die Gesamthelligkeit des zentralen Punktes wurde konstant gehalten.

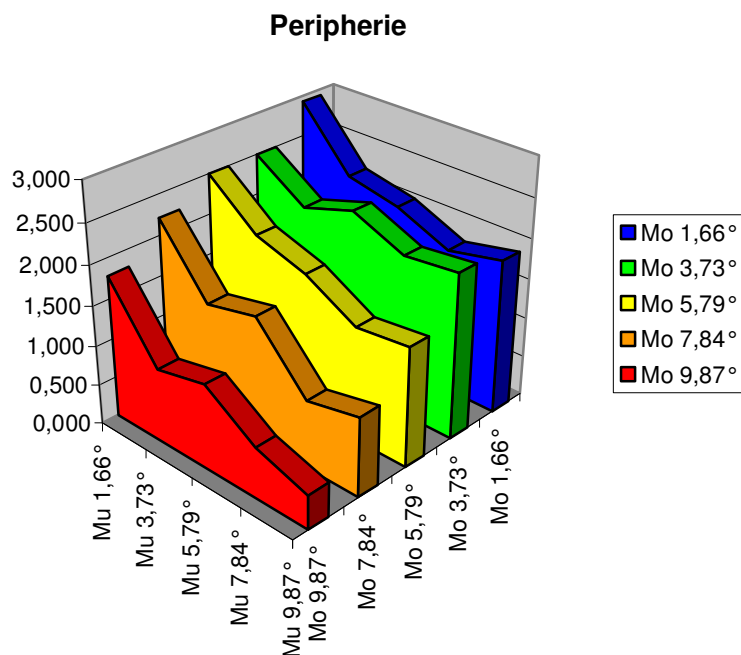


Abb. 4.4: Wahrgenommene Bewegungsinduktion der neun Versuchspersonen beim Betrachten eines peripheren Musterpunktes, analog zu Abb. 4.3. Hierbei sollten die Versuchspersonen nicht den zentralen, unbewegten Punkt fixieren, sondern den jeweils horizontal entferntesten Musterpunkt betrachten. Da die Einstellungen für hinein und hinausziehende Musterpunkte identisch sind, ist hierbei im Vergleich zu Abb. 4.3 die doppelte Datenmenge dargestellt.

Abbildung 4.3 und 4.4 zeigen auf der senkrechten z-Achse die Mittelwerte der Beurteilungen der Versuchspersonen abhängig von der Größe des zentralen Punktes und der Größe der vorbeiziehenden Musterpunkte.

Die jeweilige Größe des zentralen Musterpunktes ist hierbei durch eine einheitliche Farbe des Verlaufes entlang der y-Achse visualisiert (Bezeichnung „Mo“ für „Mond“ mit der entsprechenden Größenangabe in Grad Sehwinkel). Die Größe der vorbeiziehenden Musterpunkte (Bezeichnung „Mu“ für Musterpunkte) ist entlang der x-Achse ebenfalls in Grad Sehwinkel angegeben.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die Punktmustergröße des induzierenden Musters einen sehr großen Einfluss darauf hat, ob eine Scheinbewegung induziert wird oder nicht. Allerdings ist für die Wahrnehmung einer Scheinbewegung auch die Größe des unbewegten Objektes selber von entscheidender Bedeutung.

Kleine unbewegte Objekte werden eher als bewegt, große hingegen eher als stationär gesehen. Interessant für die Fragestellung ist hierbei vor allem, dass dieses Wahrnehmungsphänomen in der horizontalen Peripherie in einem Bereich von etwa 28° - 40° Sehwinkel in diesen Versuchen nahezu genau so funktioniert wie in der wesentlich feiner aufgelösten Zentralregion des Auges. Wird das Objekt in der Peripherie wahrgenommen, wird nahezu genau so Scheinbewegung induziert, als würde das Objekt fixiert werden.

Der präsentierte Bewegungsreiz ist stets der gleiche, allerdings ist man in der Lage, unabhängig davon, ob man einen entfernten, bewegten Musterpunkt oder den zentralen Punkt anschaut nahezu einheitliche Schwellen für die Induktion von Scheinbewegung zu finden.

Die Rolle der Größe des unbewegten Punktes für die Induktion einer Scheinbewegung ist allerdings auch wieder ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Induktionsschwelle direkt von einer übergeordneten Objekterkennung und vor allem von der daraus resultierenden Tiefenwahrnehmung abhängig ist.

Im Gegensatz zu den Versuchen 3.1 wird allerdings das sehr grobe regelmäßig bewegte Punktmuster scheinbar nicht mehr als ein einziges texturiertes Objekt wahrgenommen. Lediglich der unbewegte Punkt wird von den Versuchspersonen als relativ dazu weiter entfernt (da unbewegt) wahrgenommen und erfährt, wie auch der reale Mond beim Vorüberziehen von Kumuluswolken, eine Scheinbewegung.

Interessant ist hierbei allerdings, dass dem „Mondphänomen“ scheinbar enge Grenzen gesetzt sind: Ist die Struktur der Wolken zu einheitlich oder die Wolken zu groß (Schichtwolkenfolgen, in der Natur also Stratus-Bewölkung) oder wäre der Mond wesentlich größer (in dem er näher an der Erde wäre) oder dunkler träte diese Bewegungstäuschung nicht mehr auf.

4.2 Bewegungsinduktion der Fovea

In diesem Versuch sollte vor allem die Frage geklärt werden, ob die spezielle durch die Geometrie der Fovea bedingte Struktur der Retina einen Einfluss auf die Induktion der Wahrnehmung von Scheinbewegungen hat oder nicht. Dieser Versuch ist notwendig, da durch das relativ grobe Pixelraster (ca. $0,1^\circ$ Sehwinkel pro Pixel) des Videoprojektors eine spezifische geometrisch variierte Reizung der Fovea (Größe etwa $1,2-1,4^\circ$ Sehwinkel) selber nicht möglich war.

Dazu wurde statt eines projizierten Objektes ein Poster (120 x 120 cm) in der Mitte der Projektionsfläche angebracht, das ein grob aufgelöstes unbuntes Punktmuster (vergleiche Abb. 4.5) zeigte. Die Versuchspersonen konnten auf diesem Poster während der Projektion des bewegten Musters, bedingt durch das Auftreten des Foveaphänomens, die Abmessungen ihrer Fovea centralis scharf umgrenzt wahrnehmen. Die Größe dieses Bereiches ließ sich so bestimmen und wurde ermittelt. Mit Hilfe eines horizontal konstant bewegten, homogenen Punktmusters ließ sich dann die Schwelle für das Auftreten von Scheinbewegungen dieses kreisförmigen „Objektes“ ermitteln. Diese wurde für drei unterschiedliche Punktmuster (alle wie Abb. 4.1, allerdings mit Punktluminanzen von 6,5, 13 und $19,5 \text{ cd/m}^2$) ermittelt.

Alle Messungen wurden mit jeweils vier Versuchspersonen dreimal durchgeführt. Die Mustergeschwindigkeit betrug konstant $1,63^\circ$ Sehwinkel/s.

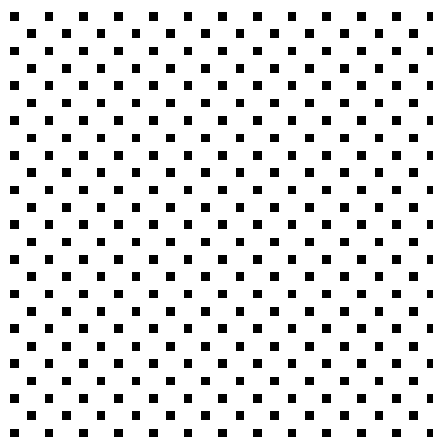


Abb. 4.5: Ausschnitt aus dem 120x120 cm großen Poster zum Erzeugen des Foveaphänomens auf der Leinwand während der Projektion im Versuch 4.2. Dieses Poster wurde in der Mitte der Präsentationsfläche aufgehängt. Während der Projektion ließ es die Fovea centralis als ein kreisförmiges Objekt hervortreten. Die vier Versuchspersonen konnten vor Versuchsbeginn zunächst die Größe ihrer Fovea bestimmen, anschließend konnte dieses „Objekt“ durch ein konstant horizontal bewegtes Punktmuster als bewegt wahrgenommen werden. Die Wahrnehmungsschwellen dieser Bewegung wurden für drei unterschiedlich helle Punktmuster (vergl. Abb. 4.1) bestimmt.

4.2 Ergebnisse

Alle Versuchspersonen sahen ihre Fovea als kreisförmiges Objekt mit einem Durchmesser von 20 Musterpunkten deutlich hervortreten (Foveaphänomen), was mit 36,3 mm bei 1,6 m Betrachtungsabstand $1,30^\circ$ Sehwinkel entspricht (mit einem möglichen Fehler von $\pm 0,13^\circ$ Sehwinkel bedingt durch die Geometrie des Posters). Dieses Objekt nahmen sie bei einer entsprechenden Punktgröße des Scheinbewegung induzierenden Musters als bewegt wahr. Abb. 4.6 zeigt die Versuchsergebnisse.

Mit einem weiteren feiner aufgelösten Punktmusterposter konnte das Foveaphänomen unter den gegebenen Beleuchtungsbedingungen von keiner Versuchsperson mehr wahrgenommen werden. Dies scheiterte auch, wenn die Helligkeit des induzierenden Punktmusters erhöht wurde. Der Versuch wurde daher nur mit dem funktionierenden, grob aufgelösten Punktmuster durchgeführt.

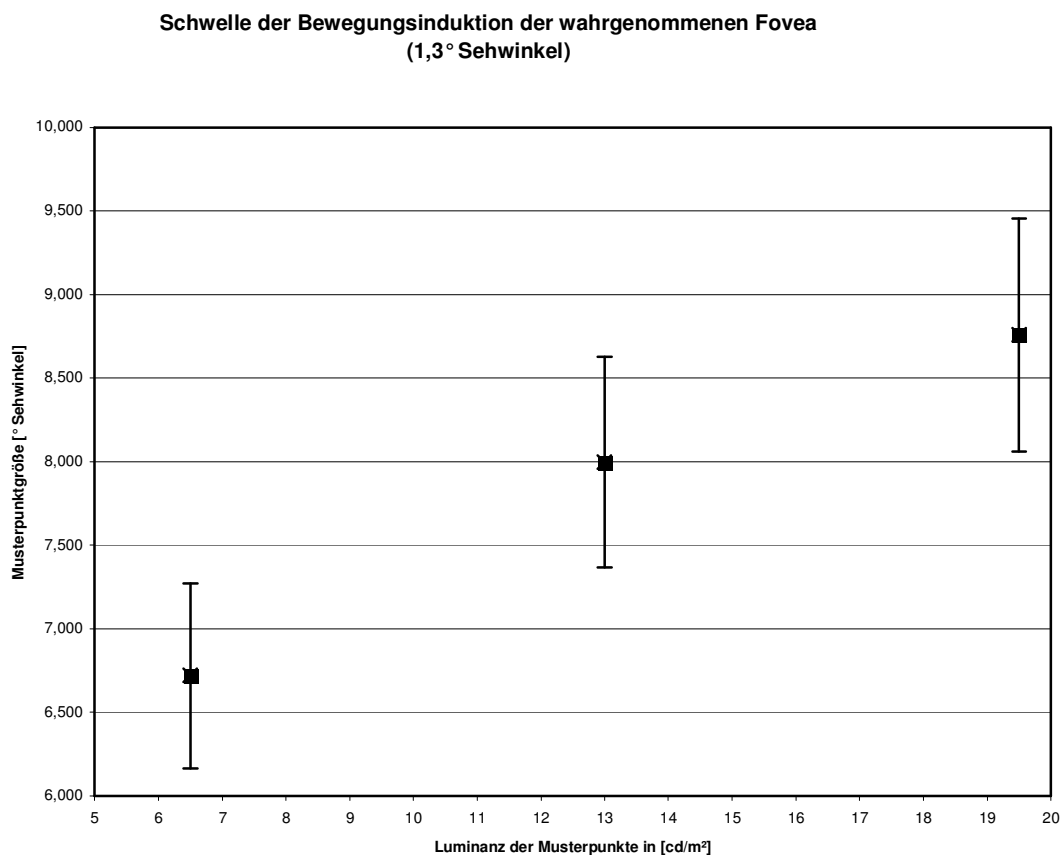


Abb. 4.6: Die Abbildung zeigt die ermittelte Schwelle der Scheinbewegungsinduktion des Foveaphänomens in Versuch 4.2. Unterhalb der einzelnen Punkte nehmen die Versuchspersonen eine Scheinbewegung der Fovea wahr, darüber nicht. Auf der x-Achse ist die Luminanz [cd/m²] der Musterpunkte aufgetragen. Die y-Achse zeigt die Größe [° Sehwinkel] der Musterpunkte. Die Punkte repräsentieren die Mittelwerte der von vier Versuchspersonen jeweils drei Mal ermittelten Schwellen der Scheinbewegungsinduktion des gesehenen Foveaphänomens, die Fehlerbalken deren Standardabweichungen. Jeder Datenpunkt entspricht zwölf Einzelmessungen.

Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass in diesem Versuch die Fovea selber als ein einziges, unbewegtes Objekt wahrgenommen wird und genau so wie ein gleich großer unbewegter dunkler projizierter Punkt im Versuch bewegt wahrgenommen werden kann. Das Foveaphänomen lässt sich nur bei langsamen Augenbewegungen (Drift) wahrnehmen, bei optokinetischen Folgebewegungen verschwindet es völlig. Da alle Versuchspersonen das Foveaphänomen während des Versuches wahrnahmen, lassen sich reflektorische Augenbewegungen als Ursache für die Wahrnehmung dieser Art von Scheinbewegungen ausschließen.

Diese Unabhängigkeit des Auftretens der Scheinbewegungen von reflektorischen Augenbewegungen wurde allerdings auch schon in anderen Versuchen mit Hilfe von Nachbildern demonstriert¹¹.

Die gefundenen Schwellen sind im Vergleich der Größen des zentralen unbewegten Objektes in Versuch 4.1 wesentlich größer. Dies liegt daran, dass kleinere Punkte in Versuch 4.1 wesentlich heller und mit höherem Kontrast projiziert wurden. Hellere Objekte werden nur mit Hilfe von wesentlich feineren induzierenden Punktmustern als bewegt wahrgenommen.

Die drei verschiedenen Messreihen zeigen ferner, dass eine größere Luminanz des induzierenden Punktmusters bereits schneller eine Scheinbewegung induziert als eines mit geringerer Luminanz.

Das Ergebnis dieses Versuches ist, da in der Fovea selber keine Bewegung stattfand, ein deutlicher Beleg dafür, dass die Struktur der zentralen Retina für das Auftreten dieser Scheinbewegung nicht benötigt wird.

¹¹ nach: C. v. Campenhausen, Die Sinne des Menschen, 2. Auflage 1993, S. 22

4.3 Versuch mit variiertem Funktionsmuster bei einer linearen Bewegung

In den Versuchen 4.1 und 4.2 wurde das induzierende Muster stets aus gleich großen Musterpunkten gebildet (siehe Abb. 4.1), die horizontal mit konstanter Geschwindigkeit über die Projektionsfläche bewegt wurden.

Um nun feststellen zu können, ob eine Veränderung der Größe dieser Punkte nach einer Funktion abhängig von der Entfernung des unbewegten Musterpunktes im Zentrum einen Einfluss auf den Beginn der Induktion von Scheinbewegungen hat, wurde die Größe dieser Punkte in einem kreisförmigen Bereich von $39,86^\circ$ Sehwinkel (400 Pixel) um die Fovea gemäß des Abstands vom Zentrum nach verschiedenen mathematischen Funktionen verändert. Dabei konnte allerdings ein Minimalwert von 30% der ursprünglichen Musterpunktgröße nicht unterschritten werden, um die Gesamthelligkeit nach der Eichfunktion des Videoprojektors (Abb. 2.2) noch konstant halten zu können.

Die Punktgrößen des induzierenden Musters wurden abhängig von der Entfernung vom Zentrum nach den Funktionen $f(x) = c x^2$, $f(x) = c \ln(x)$ und $f(x) = cx$ neu berechnet – die Messungen wurden analog zu den entstehenden dynamischen Reizmustern als „ x^2 “, „ $\ln(x)$ “ und „ x “ bezeichnet. Als Vergleichsmessung wurde der Versuch zusätzlich mit unveränderten Mustern gleicher Punktgröße (entspricht $f(x) = c$ wie aus den Versuchen 4.1 und 4.2) durchgeführt. Dieses Muster wurde im Versuch „homogen“ genannt. Die Punktgrößen, abhängig von der verwendeten Funktion und vom Abstand zum Mittelpunkt, zeigt Abb. 4.7.

Folgende Parameter wurden in diesem Versuch verwendet: Der zentrale Punkt hatte eine konstante Größe von $4,76^\circ$ Sehwinkel. Die Musterpunktgeschwindigkeit betrug konstant $1,63^\circ$ Sehwinkel/s. Die Musterpunktluminanz der unmodifizierten Musterpunkte betrug $2,3 \text{ cd/m}^2$.

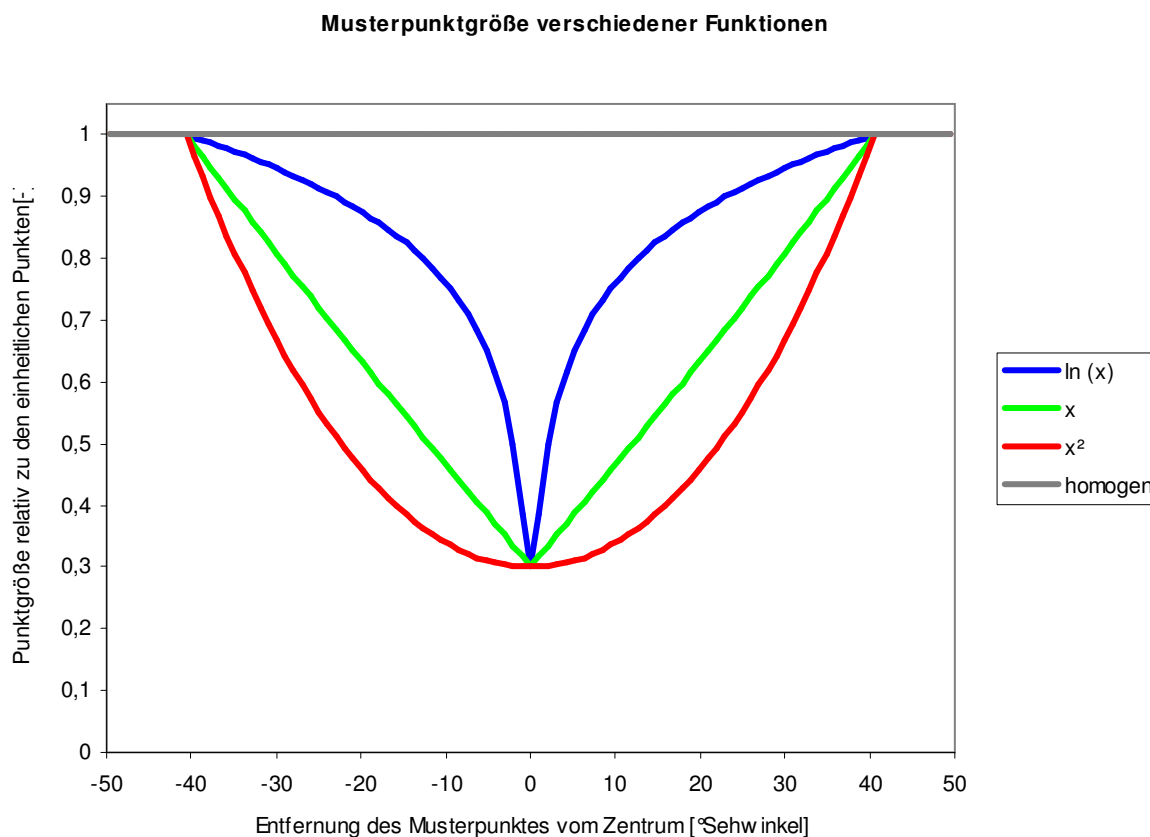


Abb. 4.7: Die Größe der Musterpunkte wird abhängig von der Entfernung zum Mittelpunkt der Projektion neu berechnet, dabei darf ein Minimalwert von 0,3 nicht unterschritten werden, um die Gesamthelligkeit des Musters durch Erhöhen der Musterpunktluminanz konstant halten zu können. Da die gesamte Fläche der Projektionsfläche insgesamt nur etwa 73° breit und 59° Sehwinkel hoch ist, werden die Größen nahezu aller sichtbaren Punkte nach den Funktionen in Echtzeit berechnet.

Die vier unterschiedlichen Muster wurden in den Messungen jeweils drei Versuchspersonen drei Mal in zwei verschiedenen Durchgängen vorgeführt. Einmal wurde die jeweilige Schwelle für die Induktion von Scheinbewegungen im zentralen unbewegten Punkt bei den unterschiedlichen Mustern ohne eine Helligkeitsanpassung, also einer größenunabhängigen konstanten Luminanz der einzelnen Punkte durchgeführt. Danach wurden sie erneut mit einer Helligkeitsanpassung durchgeführt, bei der kleinere Punkte nach der Eichfunktion des Videoprojektors (Abb. 2.2) genau so aufgehellt wurden, dass die Gesamthelligkeit des Versuches konstant blieb.

Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch den Versuch $\ln(x)$ mit der Helligkeitsanpassung der Musterpunkte.

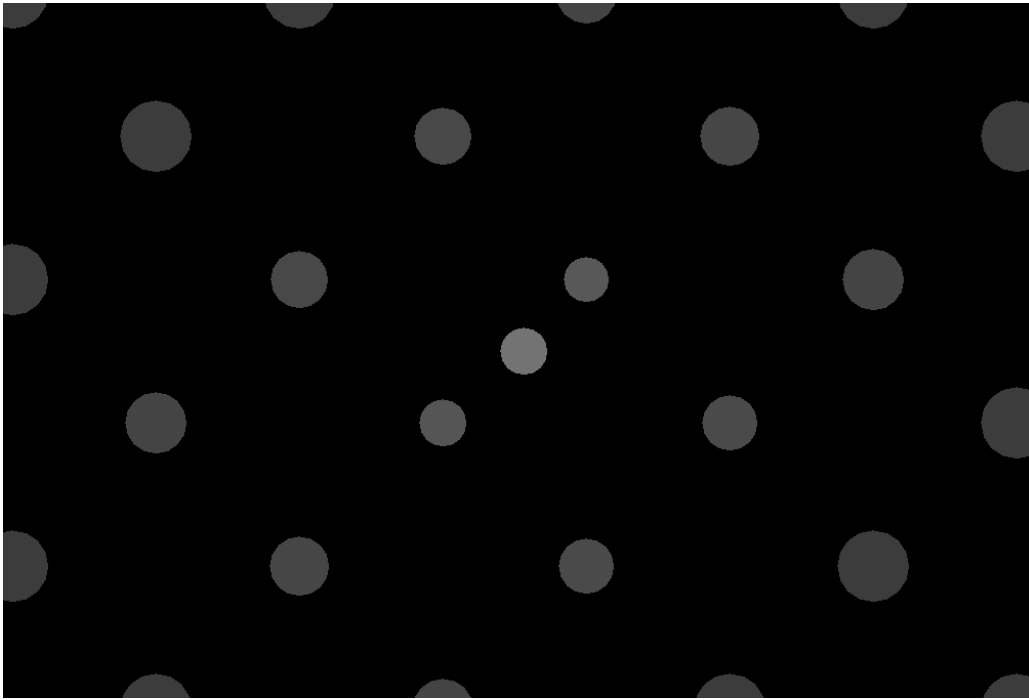


Abb. 4.8: Muster $\ln(x)$ in Versuch 4.3 mit Helligkeitskorrektur der Musterpunkte. Abhängig von der Entfernung zum Zentrum, in dem sich der unbewegte zentrale Punkt befindet, werden die Durchmesser der einzelnen Musterpunkte des gleichförmig horizontal mit $1,63^\circ$ Sehwinkel/s bewegten Musters nach der Funktion $f(x)=c \ln(x)$ in einem Bereich von $39,9^\circ$ Sehwinkel um das Zentrum herum in Echtzeit neu berechnet. Die Versuchsperson kann wie in den Versuchen 4.1 und 4.2 Abstand und Größe gemeinsam so verändern, dass die Gesamthelligkeit konstant bleibt, bis sie eine Scheinbewegungsinduktion feststellt. Die Musterpunktluminanz beträgt bei unmodifizierten Punkten $2,3 \text{ cd/m}^2$.

Ergebnisse

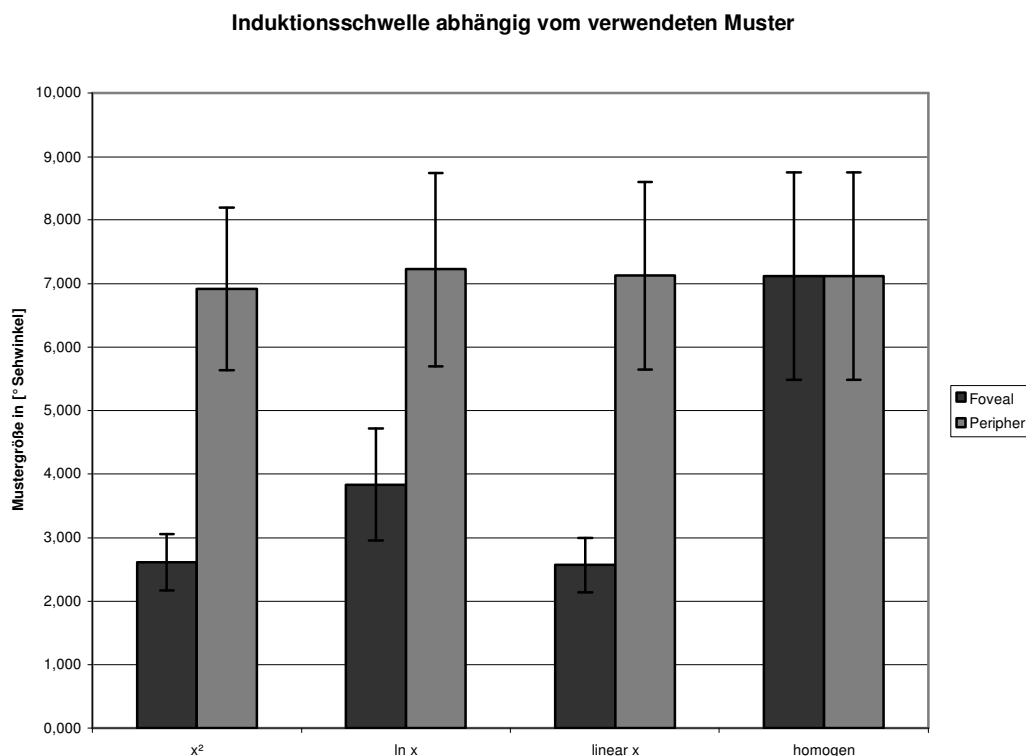


Abb. 4.9: Die Grafik zeigt die von den drei Versuchspersonen in Versuch 4.3 ermittelten Mittelwerte der Schwellen der Bewegungsinduktion abhängig vom verwendeten Muster ohne Helligkeitskorrektur. Unterhalb der gezeigten Werte wird der zentrale unbewegte Punkt als bewegt wahrgenommen, darüber nicht. Die Fehlerbalken entsprechen den Standardabweichungen. Jeder Balken entspricht neun Messungen. Die dunkelgrauen Balken entsprechen den Größen der kleinsten, dem Zentrum benachbarten Musterpunkte an der Schwelle, die hellgrauen den größten, bei 39,9° Sehwinkel befindlichen Musterpunkten. Bei dem Muster „homogen“, bei dem keine Veränderung der Punktmustergröße stattfand, sind daher diese beiden Werte gleich groß (rechts).

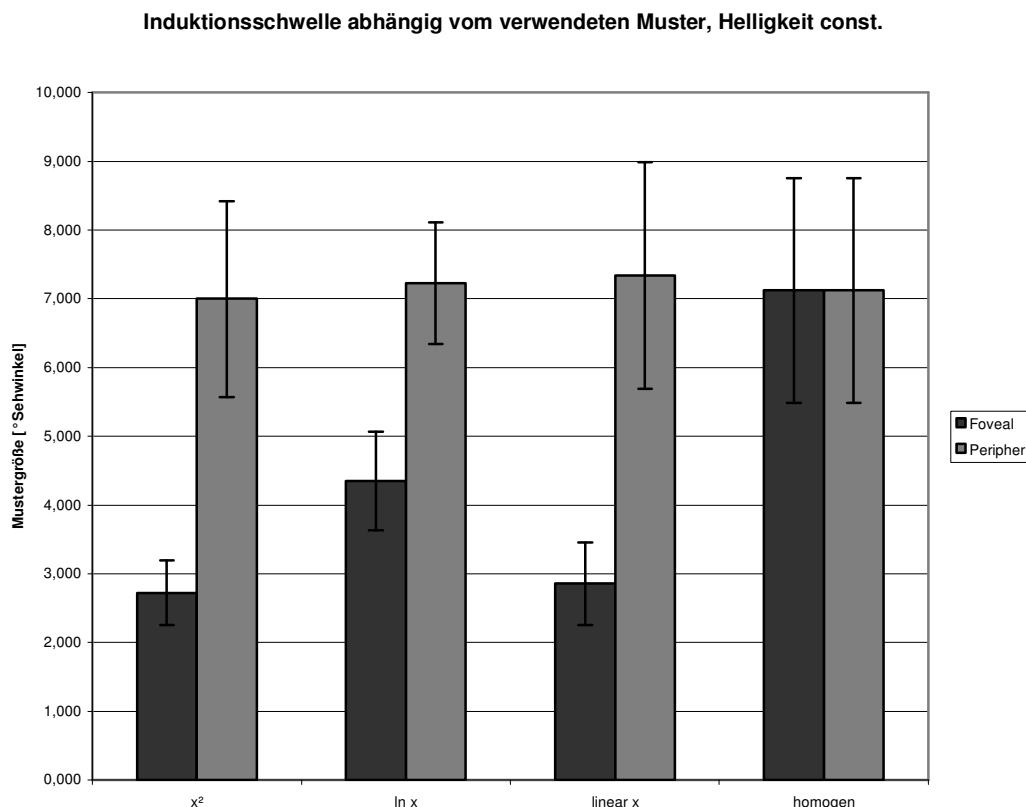


Abb. 4.10: Die Grafik zeigt analog zu Abbildung 4.9 die Mittelwerte der im zweiten Versuchsteil 4.3 von drei Versuchspersonen in drei Messungen ermittelten Schwellen der Bewegungsinduktion. Hierbei wurde allerdings die Gesamthelligkeit der Muster durch Verwendung der Eichfunktion (siehe Abb. 2.2) konstant gehalten.

Abbildung 4.9 zeigt die ermittelte Schwelle für das Auftreten von Scheinbewegungen ohne Helligkeitskorrektur, demgegenüber zeigt Abbildung 4.10 das gleiche Ergebnis mit einer Helligkeitskorrektur. Bei Musterpunktgrößen, die kleiner als die von den Balken angezeigte Größe sind, findet eine Induktion von Scheinbewegung statt, bei größeren nicht. Der dunkelgraue Balken gibt die Punktgröße des dem Zentrum am nächsten stehenden Musterpunktes an der Schwelle des Auftretens von Scheinbewegungen im unbewegten Musterpunkt an. Der hellgraue Balken zeigt die Größe der peripheren Musterpunkte des induzierenden Musters zum gleichen Zeitpunkt. Bei der Messung „homogen“ sind daher die zentralen und peripheren Musterpunkte gleich groß, es gibt auch keine Helligkeitsanpassung, weshalb hierbei alle dargestellten Ergebnisse (in Abb. 4.9 und 4.10 beim hellgrauen und dunkelgrauen Balken) identisch sind.

Diskussion

Der Versuch mit homogenen Mustern zeigt weder eine Veränderung der Ergebnisse bei einer Helligkeitsanpassung (Abb. 4.10) noch kann man, bei Betrachtung der peripheren Musterpunktgrößen an der Schwelle einen Unterschied bei der Schwelle entdecken. Die Scheinbewegungen scheinen bei der festen Größe des zentralen unbewegten Punktes immer bei einer gleichen Musterpunktgröße des induzierenden Musters in der Peripherie aufzutreten. Eine Abhängigkeit von der gewählten Funktion, nach der die Musterpunkte des induzierenden Musters abhängig von der Entfernung zum Mittelpunkt generiert wurden, ist nicht sichtbar.

Die beiden Diagramme geben einen Hinweis darauf, dass die Größe der induzierenden Musterpunkte selbst eine Rolle für den Induktionseffekt spielt. Wäre die Größe der der Fovea benachbarten Musterpunkte des induzierenden Musters entscheidend, müssten alle dunkelgrauen Balken in etwa gleich groß sein. Dies ist jedoch nicht der Fall: Die im peripheren Sehbereich gelegenen Musterpunkte sind an der Induktionsschwelle nahezu funktionsunabhängig annähernd gleich groß.

Gäbe es eine spezifische geometrische Struktur auf der Retina für die Bewegungswahrnehmung dieser Art von Scheinbewegungen, hätte zumindest eine der verwendeten Funktionen eine differenzierbare andere Induktionsschwelle bewirken müssen, da eine Reizung mit unterschiedlichen geometrisch angeordneten Musterpunkten auf der geometrischen Struktur der Detektoren zu anderen Effekten hätte führen müssen. Alle Musterpunkte haben an der Induktionsschwelle jedoch annähernd in der Peripherie die gleiche Größe (hellgraue Balken).

Da die Muster stets konstant kontrahieren, sich also mit der Verkleinerung der homogenen Musterpunkte auch linear ihr Abstand mit verkleinert, wurden bei jeder möglichen Größeneinstellung der Musterpunkte exakt gleiche Abstände zwischen den Mittelpunkten der Musterpunkte eingehalten.

Dies könnte stets identische Strukturen auf der Retina ansprechen, daher musste eine weitere Messreihe mit variierenden Abständen zwischen jeweils stets identischen Musterpunkten durchgeführt werden, wobei die Gesamthelligkeit für eine Vergleichbarkeit, anders als in den bisherigen Versuchen, mit den linear bewegten induzierenden Punktmustern ebenfalls konstant gehalten werden musste.

4.4 Messung der Bewegungsinduktion bei Entkoppelung von Musterpunktgröße und -abstand

In allen anderen Versuchen mit konstanten horizontal gleichmäßigen Bewegungen des induzierenden Musters (Versuchsgruppe 4) wurde mit der Musterpunktgröße auch gleichzeitig der Musterpunkt Abstand zueinander mit verändert, um die Gesamthelligkeit konstant zu halten. Um zu klären, ob der Abstand der Musterpunkte oder die Musterpunktgröße selber entscheidend für die Induktion von Scheinbewegungen ist, wurden in diesem Versuch diese beiden Größen voneinander entkoppelt, also Punktgröße und –abstände zueinander frei wählbar gestaltet.

Die Versuchspersonen sollten hierbei wieder die Grenze des Auftretens einer Scheinbewegungswahrnehmung melden. Mit zunehmender Punktgröße nahm also die Punkthelligkeit ab, mit geringeren Abständen zueinander nahm die Punkthelligkeit zu (Abb. 4.11).

Die Größe des zentralen unbewegten Objektes betrug $4,76^\circ$ Sehwinkel (46 Pixel). Die Musterpunktgröße blieb über den Darstellungsbereich jeweils konstant. Die Helligkeitskorrektur (nach der Eichkurve des Videoprojektors) der Musterpunkte sorgte für eine jeweils identische Gesamthelligkeit. Die Geschwindigkeit des induzierenden Musters war konstant bei $1,63^\circ$ Sehwinkel/s. Die Musterpunkthelligkeit betrug stets 1 bez. 4 cd/m^2 im Musterpunkt zu Beginn der Messung. Der Versuch wurde mit zwei Versuchspersonen in jeweils zwei Messreihen durchgeführt, die sich in der Ausgangshelligkeit der Punktmuster unterschieden.

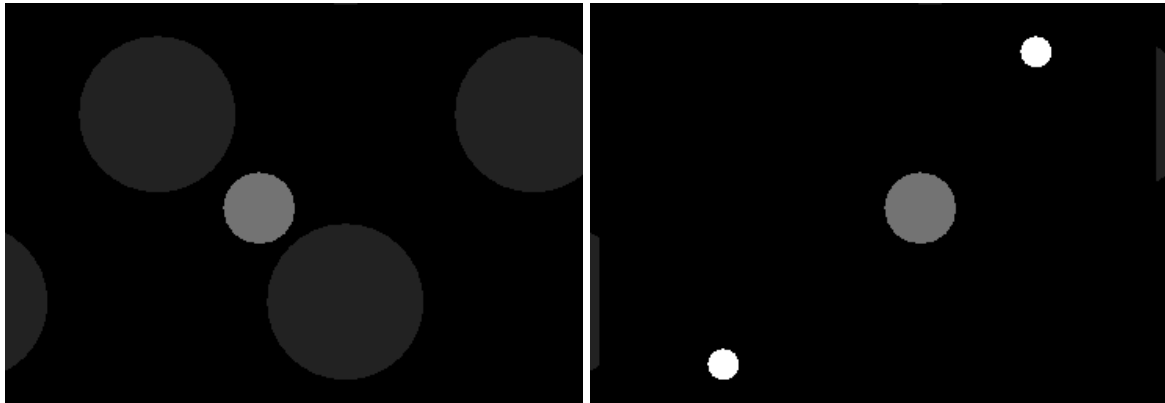


Abb. 4.11: Zentrale Ausschnitte der Projektionsfläche in Versuch 4.3 mit dicht beieinander liegenden, großen (links) und entfernten, kleinen Musterpunkten. Im Zentrum ist jeweils der unbewegte Punkt zu sehen. Die Gesamthelligkeit wird mit Hilfe der Eichfunktion des Videoprojektors (Abb. 2.2) konstant gehalten, weshalb sich allerdings der Kontrast bei kleineren Musterpunkten (rechts) erheblich verstärkte.

Ergebnisse

Nur Messungen, die mehrfach hintereinander konsistent von den Versuchspersonen reproduzierbar waren, wurden berücksichtigt, weshalb es nur zwei Messreihen beider Versuche von jeweils nur zwei „funktionierenden“ Versuchspersonen gab.

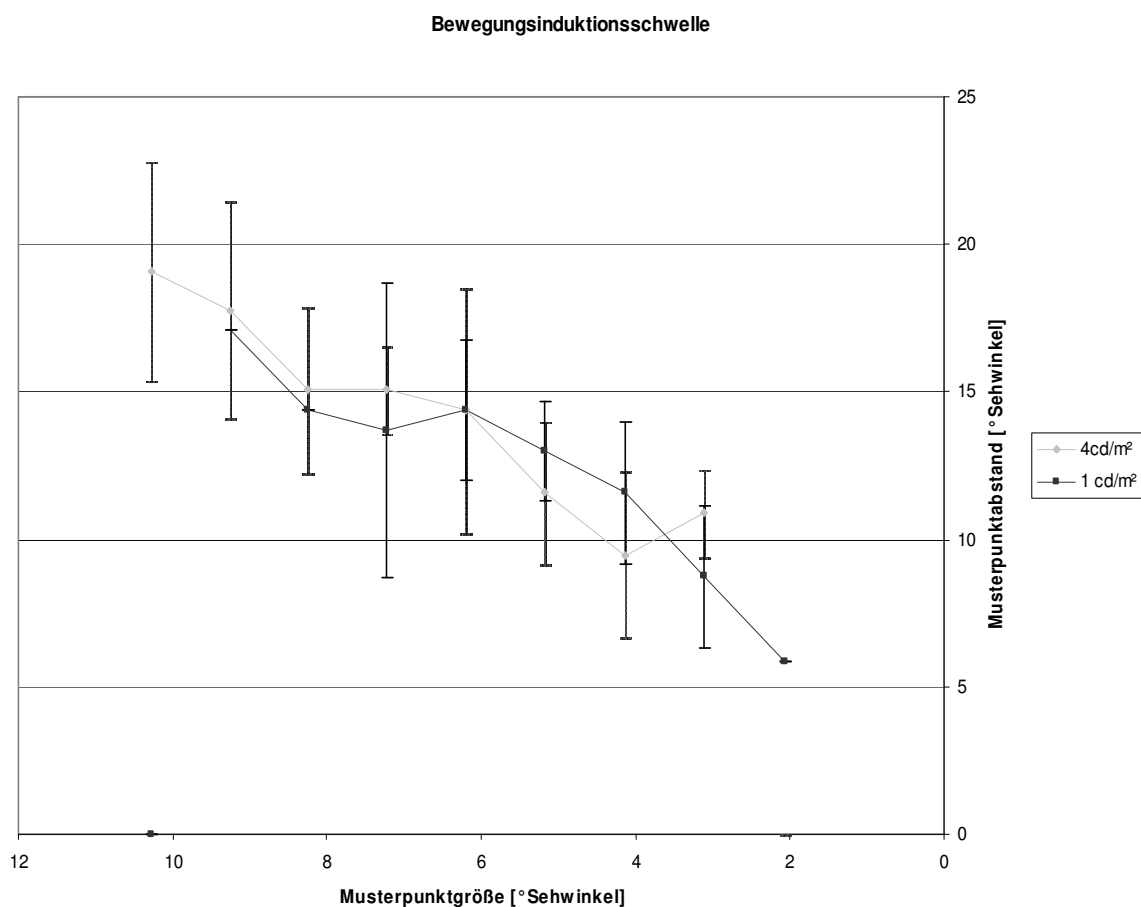


Abb. 4.12: Die Grafik zeigt die Schwelle des Auftretens einer Scheinbewegung des unbewegten zentralen Punktes abhängig von der Größe und dem Abstand der Mittelpunkte der Musterpunkte der zwei Versuchspersonen in Versuch 4.4. Jeder Datenpunkt entspricht maximal vier reproduzierbaren Messungen. Die hellgraue Kurve stellt die Einstellungen bei zunächst 4 cd/m² hellen Musterpunkten (entspricht insgesamt 0,85 cd/m² auf der Projektionsfläche) dar, die dunkelgraue zeigt die Messwerte für zunächst 1 cd/m² (entspricht insgesamt 0,55 cd/m² auf der Projektionsfläche). Unterhalb der Kurven findet eine Induktion einer Scheinbewegung statt, darüber nicht. Auf der x-Achse ist der Abstand in [° Sehwinkel] der Mittelpunkte der Musterpunkte zueinander aufgetragen, auf der y-Achse die Musterpunktgröße in [° Sehwinkel]. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichungen dar. Der Wert für etwa 2° Sehwinkel große Musterpunkte konnte nur einmal ermittelt werden.

Da in Abb. 4.12 ein nahezu linearer helligkeitsunabhängiger Zusammenhang zwischen Musterpunktgröße und –abstand erkennbar ist, wurden diese Daten erneut ausgewertet, um den (kürzesten) Abstand der Kanten des induzierenden Musters zueinander an der Induktionsschwelle zu ermitteln.

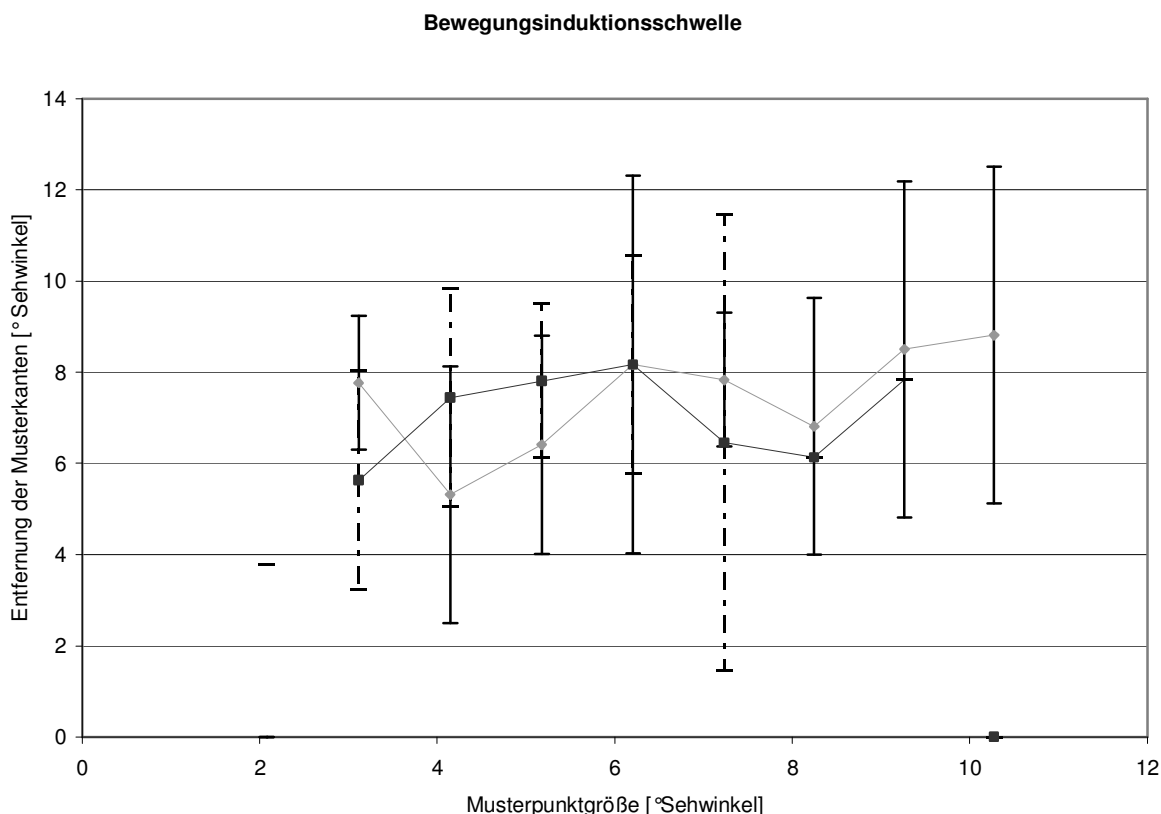


Abb. 4.13: Die Grafik zeigt analog zu Abbildung 4.12 die Entfernung der Musterkanten (y-Achse in ° Sehwinkel) zueinander an der Schwelle des Auftretens von Scheinbewegungen abhängig von der Musterpunktgröße (x-Achse in ° Sehwinkel). Die hellgraue Kurve zeigt die Ergebnisse für das zunächst hellere Punktmuster (zunächst 4 cd/m²), die dunkelgraue analog dazu die des dunkleren Punktmusters (zunächst 1 cd/m²). Unterhalb der Kurven findet eine Bewegungsinduktion statt, darüber nicht. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichungen.

Diskussion

Nachdem ein nahezu linearer Zusammenhang an der Bewegungsschwelle zwischen Musterpunktgröße und –abstand ersichtlich wurde (Abb. 4.12) wurden die ermittelten Messdaten nach dem geringsten Abstand der Musterpunktkanten zueinander erneut ausgewertet (Abb. 4.13). Diese Auswertung zeigt die Grenze des Auftretens einer Scheinbewegung im unbewegten 4,76° Sehwinkel großen zentralen Punkt bei etwa 7° Sehwinkel (+/-1°) Abstand der Musterkanten. Dies ist nahezu unabhängig von der Musterpunktgröße – unterhalb der Kurve wird eine Scheinbewegung wahrgenommen, darüber nicht. Diese Schwelle war von den Versuchspersonen recht schwer feststellbar, was zu den hohen Standardabweichungen führte.

Abhängig von der Größe und Helligkeit des zentralen Objektes, bei dem eine Scheinbewegung induziert werden soll, scheint es lediglich einen festen entsprechenden Kantenabstand der vorüberziehenden Objekte zu geben, der nicht überschritten werden darf, damit es noch zu einer Induktion von Scheinbewegung im unbewegten Objekt kommt. Dies erklärt die Ergebnisse des Versuches 4.1 genauer. Erstaunlich hierbei ist jedoch, dass dabei die Helligkeit des Punktmusters selber und damit der Kontrast scheinbar keine Rolle zu spielen scheint (siehe Abb. 4.13). Dies deutet auf ein Funktionieren der Objekterkennung auch bei den bewegten Musterpunkten hin. Bei zu geringen Kontrasten und bei zu wenigen differenzierbaren Kanten (also zu kleinen Musterpunkten) scheint jedoch keine Induktion von Scheinbewegung mehr möglich zu sein.

Dieses Ergebnis zeigt, dass es fest abhängig von der Größe und der Helligkeit des unbewegten Objektes eine Zuordnung von Scheintiefe zu geben scheint. Ob es nun zu einer Scheinbewegung in diesem Objekt kommt oder nicht hängt von dem Abstand der Kanten im induzierenden Großfeldreiz ab. Je mehr Kanten vorhanden und je dichter sie aneinander angeordnet sind, umso besser funktioniert die Wahrnehmung einer Scheinbewegung. Dies spricht stark dafür, dass der Input der Y-Zellen quantitativ ausgewertet wird und bei einem zu starken Input über diesen Kanal fälschlicherweise eine Bewegung im unbewegten Objekt wahrgenommen wird. Erkenntnisse über geometrische Besonderheiten des Bewegungsdetektors lassen sich daher mit fixierten, unbewegten zentralen Objekten nicht gewinnen.

4.5 Induktion von Scheinbewegungen bei unterschiedlicher Position und Größe des unbewegten Objektes

In diesem Versuch sollte geklärt werden, ob die Reizung mit dem Muster „ln(x)“ aus Versuch 4.3 bei der Induktion von Scheinbewegungen an unterschiedlichen Stellen der Retina geometrisch differenzierbare Ergebnisse liefert. Dazu wurde der unbewegte Punkt, in dem die Scheinbewegung induziert werden sollte, vom Fixationspunkt um $19,9^\circ$ bez. $28,5^\circ$ Sehwinkel horizontal verschoben präsentiert (s. Abb. 4.13).

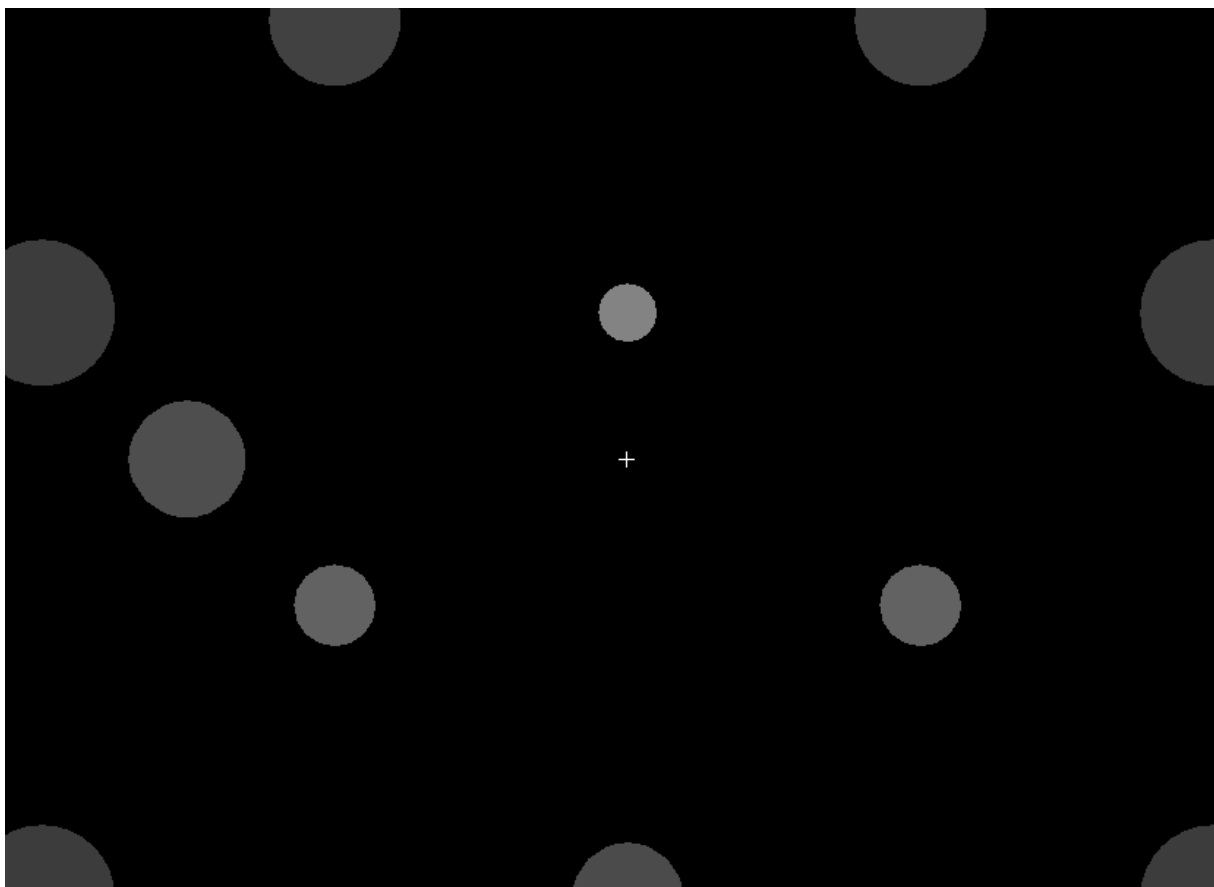


Abb. 4.13: Ausschnitt aus der Ansicht des Versuches 4.5. Das unbewegte Objekt (links zwischen einem kleineren und einem größeren Musterpunkt, auch „Induktionspunkt“ genannt) und der Fixationspunkt (das „+“-Zeichen in der Bildmitte) sind räumlich horizontal getrennt darstellbar. Die bewegten Musterpunkte verändern mit zunehmendem Abstand vom Fixationspunkt dynamisch ihre Größe nach der Funktion $f(x) = c \ln(x)$. Die Abbildung zeigt den Versuch bei einer horizontalen Entfernung von $28,5^\circ$ Sehwinkel zwischen Induktions- und Fixationspunkt.

Die Mustergeschwindigkeit betrug stets $4,14^\circ$ Sehwinkel/s, die Gesamthelligkeit wurde nach der ermittelten Eichfunktion des Videoprojektors durch Veränderung der Helligkeit des induzierten Punktes (im folgenden auch „Induktionspunkt“ genannt) und durch das Verändern der Punktmusterhelligkeit und des daran korrelierenden Abstandes annähernd konstant gehalten. Die Luminanz der größten Musterpunkte betrug dabei konstant $1,5 \text{ cd/m}^2$. Im Gegensatz zum Versuch 4.4 musste auf ein Entkoppeln von Punktmustergröße und Punktabstand zugunsten der Durchführbarkeit verzichtet werden.

Der Versuch wurde mit drei Versuchspersonen durchgeführt, die in insgesamt 9 Messreihen mit jeweils 36 Einzelmessungen in zufälliger Reihenfolge durchführten. Dabei befand sich der unbewegte Punkt entweder im Zentrum, bei $19,9^\circ$ oder bei $28,5^\circ$ Sehwinkel horizontal verschoben mit jeweils vier verschiedenen unterschiedlichen Größen des unbewegten zentralen Punktes von $4,1^\circ$, von $6,2^\circ$, von $8,3^\circ$ oder $10,3^\circ$ Sehwinkel.

Ergebnisse

Die Durchführung der Versuche erwies sich als äußerst langwierig, da nach etwa sechs bis maximal acht Einzelmessungen die Versuchspersonen an die Bewegung adaptierten und entweder keinerlei Induktion mehr wahrnehmen konnten oder stets eine Induktion bemerkten. Dieser Effekt verschwand erst am nächsten Tag, nicht jedoch schon nach wenigen Stunden.

Mehrere in den weiteren Versuchsergebnissen nicht berücksichtigte Versuchspersonen nahmen den Fixationspunkt (das kleine + in Abb. 4.13) und ebenfalls unbewegten Induktionspunkt spontan als eine Einheit wahr und konnten daraufhin keine Induktion von Scheinbewegung mehr in diesem recht großen „Objekt“ erkennen (vergleiche Versuchsteil 3.1).

Die Ergebnisse stellen daher nur die Einstellungen von drei Versuchspersonen dar, die die Schwelle hintereinander reproduzierbar einstellen konnten.

Die unterschiedlichen Größen des unbewegten Punktes wurden zwar bei den fovealen Versuchen erkannt, nicht jedoch, wenn die Position des Punktes vom Fixationspunkt abwich. Die Versuchspersonen gaben dann an, abgesehen von den

verschiedenen Positionen des unbewegten Punktes innerhalb einer Messreihe stets identische Versuchsanordnungen wahrgenommen zu haben.

Bei der Exzentrizität des Induktionspunktes von $28,5^\circ$ Sehwinkel schien bei allen Versuchspersonen während der Versuche der Induktionspunkt nach wenigen Sekunden zu verschwinden. Nur durch ein Wackeln des Kopfes konnte die Versuchsperson ihn wieder kurzzeitig wahrnehmen, was den Versuchsablauf zusätzlich verzögerte. Bei einigen Versuchspersonen trat dieser Effekt auch bei den Messungen mit $19,9^\circ$ Sehwinkel horizontal verschobenem Induktionspunkt auf.

Die folgenden Grafiken (Abb. 4.14 und 4.15) zeigen zunächst die Schwelle der Wahrnehmung von Scheinbewegung abhängig von der Musterpunktgröße am Fixationspunkt für die drei Messreihen. Die zweite zeigt die Abstände der Musterpunktkanten jeweils zum Fixationspunkt an der Bewegungsinduktionsschwelle.

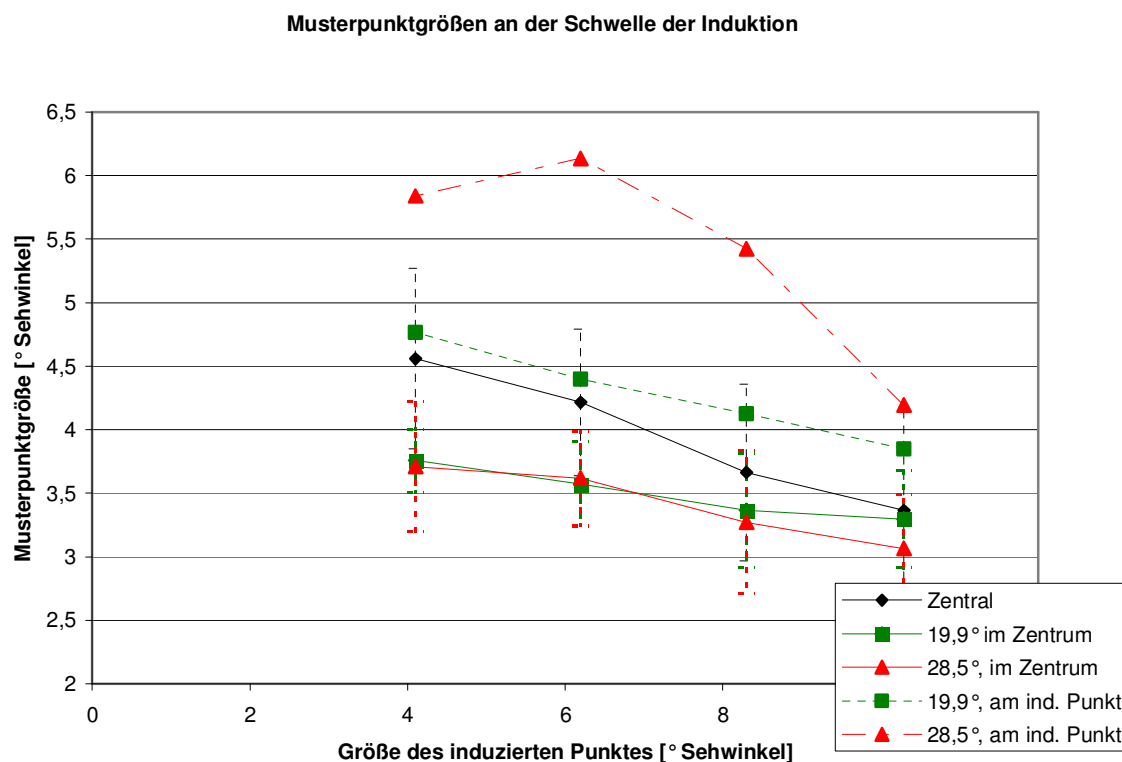


Abb. 4.14: Die Grafik zeigt die Einstellungen der Induktionsschwelle für das Auftreten von Scheinbewegungen im unbewegten Punkt der drei Versuchspersonen in Versuch 4.5. Unterhalb der einzelnen Datenpunkte wird eine Scheinbewegung wahrgenommen, darüber nicht. Jeder Datenpunkt entspricht sechs Messungen, die Fehlerbalken zeigen deren Standardabweichungen. Die Größe des jeweils induzierten Punktes ist auf der x-Achse dargestellt. Die Größe der Musterpunktgröße an der Schwelle der Bewegungsinduktion ist auf der y-Achse gezeigt. Die schwarzen Punkte zeigen die Messungen mit unterschiedlich großen unbewegten Punkten im Fixationspunkt (also Zentral). Analog dazu zeigen die grünen Punkte die gleiche Messung, wenn Fixationspunkt und unbewegter Punkt $19,9^\circ$ Sehwinkel horizontal von einander abweichen, die roten eine Abweichung von $28,5^\circ$ Sehwinkel. Dabei kann man jeweils die Größen zweier Musterpunkte pro Messung bestimmen, nämlich die der dem Fixationspunkt am nächsten stehenden (in der Abbildung tiefer) und die dem unbewegten Punkt am nächsten stehenden (in der Abbildung höher, ohne Fehlerbalken).

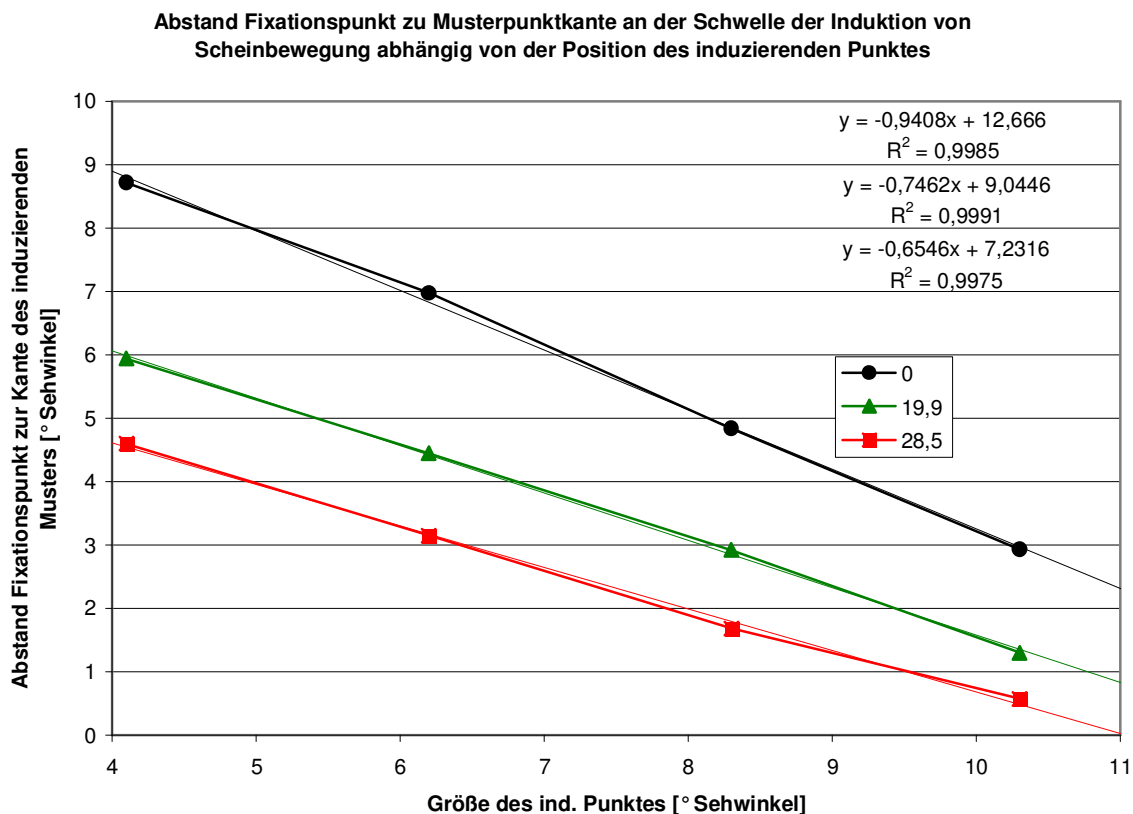


Abb. 4.15: Die Grafik zeigt den Abstand zwischen Fixationspunkt (siehe Abb. 4.13) und nächstem Musterpunkt an der Schwelle der Induktion von Scheinbewegung (y-Achse) relativ zur Größe des Induktionspunktes (x-Achse) im Versuch 4.5. Unterhalb der Messpunkte erscheint der unbewegte Punkt bewegt, darüber unbewegt. Der Versuch wurde mit drei Versuchspersonen jeweils zwei Mal durchgeführt. Jeder Musterpunkt entspricht sechs Einzelmessungen. Die schwarzen Punkte entsprechen den Messungen, in denen der Fixationspunkt dem Induktionspunkt entsprach, bei den grünen Punkten war der Induktionspunkt und der Fixationspunkt 19,9° Sehwinkel, bei den roten Punkten 28,5° Sehwinkel voneinander horizontal entfernt. Die entsprechend gefärbten Funktionen geben die lineare Regressionsgeraden der jeweils vier ermittelten Werte und ihr Bestimmtheitsmaß an.

Diskussion

Der Effekt, dass bei der horizontalen Trennung von Induktionspunkt und Fixationspunkt das unbewegte Objekt verschwindet, lässt sich durch das Phänomen der „*motion induced blindness*“, der bewegungsinduzierten Blindheit (Bonneh, Cooperman, Sagi, 2001), vollständig erklären. Hierbei entfällt nach dem Aufmerksamkeitsprinzip die Wahrnehmung auch sehr großer, kontrastreicher unbewegter Objekte außerhalb der Fovea zugunsten von bewegten Objekten nach kurzer Zeit.

Die Induktion von Scheinbewegungen benötigt, abhängig von der Größe des unbewegten Objektes, in der Fovea einen festen Kantenabstand hin zum Scheinbewegung induzierenden Punktmuster. In der horizontalen Peripherie, also wenn der induzierende Punkt entweder $19,9^\circ$ Sehwinkel oder $28,5^\circ$ Sehwinkel vom Fixationspunkt entfernt ist, funktioniert diese Induktion erst bei kleineren zentralen Kantenabständen (Abb. 4.14).

Die Induktion der Scheinbewegungen selber funktioniert in der Peripherie ähnlich wie im Zentrum, so dass den Versuchspersonen kein differenzierbarer Unterschied ihrer Einstellungen während den einzelnen Messungen auffiel. Die Unterschiede in den Einstellungen lassen jedoch entweder darauf schließen, dass das Scheinbewegung generierende System nicht homogen einheitlich über die gesamte Retina arbeitet oder die relative Tiefen- oder Größenbestimmung des unbewegten Objektes in der horizontalen Peripherie schlechter funktioniert als in der Fovea.

Der ermittelte minimale Kantenabstand in Abb. 4.15 im Ergebnisteil zeigt im Messbereich einen linearen Zusammenhang zwischen der Größe des unbewegten Punktes an dem die Induktion erfolgt und dem Kantenabstand. Größere Punkte benötigen einen dichteren Abstand zu den Kanten als kleinere. Dieser Zusammenhang zwischen Objektgröße und fovealem Kantenabstand ist umgekehrt proportional. Die eingezeichneten linearen Regressionsgraden und ihr statistisches Bestimmtheitsmaß bestätigen dies.

Mit größerer Exzentrizität der Position des unbewegten Punktes auf der Retina wird die Steigung dieser Geraden flacher und es werden kleinere Kantenabstände im Zentrum benötigt, um eine Scheinbewegung wahrnehmen zu können.

Für eine Induktion von Scheinbewegung weit außerhalb der Fovea werden dichtere Muster mit deutlich geringeren Kantenabständen zueinander benötigt.

Dies lässt darauf schließen, dass unbewegte Objekte in der horizontalen Peripherie als scheinbar größer oder heller wahrgenommen werden müssen als in der Fovea.

5 Abschließende Beurteilung der Versuchsergebnisse

Als Ursache für das Entstehen der wahrgenommenen Scheinbewegungen können Augenbewegungen definitiv ausgeschlossen werden (Versuch 4.2).

Die Versuche in der Versuchsgruppe 3.1 lösten eine starke Tendenz aus, die präsentierten Reizmuster zu einem Objekt zusammenzufassen. Hier konnten die Versuchspersonen sogar durch das Einstellen einer geringeren Bewegung den zunächst unbewegten Punkt und das Punktmuster gedanklich zu einem minimal bewegten räumlichen Objekt fusionieren. Eine solche Fusionierung gelang ungewollt auch bei Versuch 4.5 zwischen Objekt und Fixierpunkt.

In den Versuchen der Versuchsgruppe 4 wurde nur ein relativ kleines unbewegtes Objekt von maximal etwa 10° Sehwinkel verwendet. Dieses wird stets als „weiter entfernt“ als das bewegte Punktmuster wahrgenommen, es findet eine räumliche Zuordnung statt. Eine Veränderung von Größe oder Helligkeit des unbewegten Objektes wie in den Versuchen 4 scheint lediglich eine Veränderung der Tiefenwahrnehmung des betreffenden Objektes auszulösen. Dabei sind große, helle Objekte „weiter vorne“ als kleine, dunkle. Wird dem unbewegten Objekt eine größere Entfernung zugeschrieben, werden die Scheinbewegungen eher wahrgenommen als bei „näheren“, also helleren und größeren Objekten. Diese Hypothese erklärt die Ergebnisse des Versuches 4.1.

Abhängig von der wahrgenommenen Scheintiefe scheint es einen festen Kantenabstand im Ganzfeldreiz zu geben, der unterschritten werden muss, damit eine Scheinbewegung im unbewegten Objekt wahrgenommen wird. Versuch 4.4 zeigt, dass sogar eine Veränderung der Musterpunktgröße und Helligkeit im induzierenden Muster für die Induktion von Scheinbewegungen kaum Effekt zeigt, solange der Kantenabstand und das Objekt selber einheitlich bleiben. Dies lässt auf einen sehr grob verteilten, geometrisch eher einheitlich strukturierten Bewegungsdetektor schließen. Gleichzeitig deutet der Versuch 4.1 allerdings an, dass auch noch sehr feine Unterschiede der Kantenabstände im Punktmuster durch diesen Bewegungsdetektor aufgelöst werden.

Der für die Induktion von Scheinbewegungen in einem unbewegten Objekt benötigte Kantenabstand bei einem relativ einheitlichen Großfeldreiz wird vor allem durch die zentrale Retina bestimmt (Versuch 3.2.2.2). Die räumliche Zuordnung des Hintergrundmusters relativ zum bewegten Vordergrundmuster findet wohl nicht statt, wodurch erst eine subjektiv differenzierbare Qualität in der Induktion von Scheinbewegungen möglich wird.

Dies steht jedoch auf den ersten Blick im Widerspruch zu den Ergebnissen des Versuches 4.3, in dem gezeigt wurde, dass die Größe der zentralen Musterpunkte keine Rolle für die Induktion von Scheinbewegungen hat. Dies lässt sich jedoch insofern ausräumen, dass bei Versuch 4.3 die Abstände der Mustermittelpunkte an der Schwelle der Bewegungswahrnehmung annähernd identisch waren und damit auch die Kantenabstände der verschieden großen Musterpunkte an der Schwelle nahezu gleich groß gewesen sein müssen.

Objekte in der horizontalen Peripherie lassen sich, bedingt durch die wesentlich gröbere Auflösung der Retina mit zunehmendem Abstand von der Fovea, nur schwer exakt in Größe und Helligkeit bestimmen. Dies führt vermutlich zur Wahrnehmung durchweg „größerer“ oder zumindest „hellerer“ Objekte, die daraufhin „näher“ erscheinen als bei einer direkten Betrachtung und daher auch dichtere Kantenabstände im induzierenden Muster benötigen. Versuch 4.5 zeigt dies deutlich. Mit zunehmender Exzentrizität der Position des unbewegten Objektes relativ zum Fixierpunkt sind wesentlich feinere Kantenabstände des induzierenden Musters zum Fixierpunkt nötig für eine Induktion von Scheinbewegung. Bei Versuch 4.1 trat dieser Effekt vermutlich nicht auf, da die retinale Projektion des unbewegten Punktes durch das Fixieren der Versuchspersonen auf einen Musterpunkt stets bewegt war, was eine genauere Größen- und Helligkeitsbestimmung des peripheren, unbewegten Punktes zuließ, als bei der retinal unbewegten Projektion in Versuch 4.5, die sogar zum völligen Verschwinden dieses Punktes führen konnte.

Der Bewegungsdetektor, der für die Induktion dieser Art von Scheinbewegungen verantwortlich ist, hat also eine geometrische Struktur, die nicht streng homogen über die Retina angeordnet ist, was vermutlich aus den Feldgrößen der Y-Zellen resultiert. Allerdings zeigen der Versuch 4.5 und 4.1, dass die prinzipielle Funktionsweise

dieses neuronalen Bewegungsdetektors in der Peripherie des Sehfeldes (bis etwa 30° Sehwinkel) annähernd genau so ausgewertet wird, wie in der Zentralregion des Auges. Besonders spezialisierte Bereiche oder Strukturen für das Wahrnehmen von Bewegungen sind gemessen an der Induktion von Scheinbewegungen in diesem Bereich also nicht feststellbar.

Der scheinbare Widerspruch, dass das diese Bewegungen detektierende System einerseits nur sehr grob und über die gesamte Retina annähernd gleich arbeitet, andererseits aber auch noch auf sehr feine Unterschiede reagiert, könnte sich theoretisch durch das Vorhandensein von mindestens zwei verschiedenen Bewegung detektierenden Systemen erklären: Eines, das an die rezeptive Feldgröße der Ganglienzellen gekoppelt ist und ein weiteres, das davon unabhängig ist. Diese ermitteln stets gemeinsam die Bewegung von wahrgenommenen Objekten, wobei eine wesentlich feiner arbeitende Objekterkennung und die gleichzeitig erfolgende Tiefenwahrnehmung die Bewegungszuordnung stets dominiert.

Dies kann durch die Ergebnisse des Versuches 3.1 wie auch durch neuere Magnetresonanztomographie-Untersuchungen des Gehirns bei der Wahrnehmung von bewegten Scheinkanten (Seghier, 2000) so erklärt werden, dass die gesamte geometrisch spezifische Auflösung der Bewegungswahrnehmung durch die in höheren Gehirnarealen stattfindende Objekterkennung vollständig unterbunden werden kann, in dem vorhandene Kanten in V1 ignoriert und Scheinkanten in V1 dargestellt werden.

Die Entstehung der untersuchten Art von Scheinbewegungen resultiert (außer in den Versuchen 3.2) also höchst wahrscheinlich stets aus der räumlichen Tiefenzuordnung des unbewegten Objektes, das abhängig von der scheinbaren Entfernung eher als stillstehend oder als bewegt wahrgenommen wird, je nach dem welcher Kantenabstand im vorüberziehenden Großfeldreiz (peri-)foveal ermittelt wird.

Andere, aktuelle Forschungsergebnisse stützen diese Vermutung. So wurde zusätzlich zu dem magnozellularen Pfad der Bewegungserkennung der koniozelluläre Weg entdeckt. Ersterer erhält seinen Input vor allem aus den L- und

M-Zapfen, reagiert eher auf langsame Bewegungen und hat eine geometrische Struktur, die in etwa der der Y-Zellen entspricht.

Der zweite Weg erhält seinen Input vor allem über in der Retina seltener vorhandenen S-Zapfen, reagiert vor allem auf schnellere Bewegungen und scheint eine geometrische Verteilung auf der Retina zu haben, die der der selteneren S-on-Ganglienzellen (Martin, 1997) entspricht. Diese haben verglichen mit den riesigen, sich mehrfach überlappenden dendritischen Feldern der Y-Zellen nur relativ kleine Felder und sind sehr spärlich über die Retina verteilt.

Aktuelle Forschungsergebnisse belegen auch einen direkten Input von etwa 10% der koniozellulären Zellen des CGL direkt in den MT unter Umgehung von V1 und V2 (Sincich, 2004).

Allgemein wird vermutet, dass dieser Input stets zur Verifizierung der gewonnenen Bewegungsinformationen des magnozullulären Weges aus V1 und V3 verwendet wird und so speziell die Unterscheidbarkeit von Bewegungstäuschungen verhindert, die in dieser Arbeit zur genaueren Untersuchung der Geometrie des Scheinbewegung detektierenden Systems verwendet werden sollte.

Die Bewegungswahrnehmung scheint je nach Reizung der entsprechenden Zapfen und der Geschwindigkeit des bewegten Objektes oder auch nur einer Kante davon stets aus zumindest diesen beiden Informationen gemeinsam generiert zu werden.

Versuch 3.2, in dem eine räumlich exaktere Zuordnung des Hintergrundmusters durch Verwendung eines zweiten Ganzfeldreizes zumindest stark eingeschränkt wurde, zeigt dabei, dass erst sehr große Unterschiede in der Geometrie der Reizung selber von den Versuchspersonen differenzierbar sind: Erst unterschiedliche Reizmuster, deren Kreisradien um mindestens 4° Sehwinkel voneinander abweichen, lassen sich bewusst voneinander differenzieren. Dies scheint daran zu liegen, dass erst diese sehr großen Unterschiede in der geometrischen Struktur, die die geometrischen Besonderheiten beider Bewegungsdetektoren selber – vergleichbar dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen – ändern, differenziert beurteilt werden können und dies auch nur, wenn eine vollständige Objekterkennung mit einer Tiefenwahrnehmung unterbunden wurde.

Eine noch feinere Aufschlüsselung der Wirkung der einzelnen Bewegungsdetektoren lässt sich mit den in diesen Versuchen verwendeten, nahezu unbunten Reizmustern daher nicht bewerkstelligen und auch nicht explizit einzelnen kortikalen oder subkortikalen verarbeitenden Elementen zuordnen.

Die Reize müssten wesentlich spezifischer an die Reizantwort der entsprechenden Zapfensysteme angepasst werden und zusätzlich wesentlich feiner als es die Auflösung und Rechengeschwindigkeit aktuell erhältlicher Technik erlauben würde an die Geometrien und Reaktionen der unterschiedlichen Systeme angepasst werden.

Weiterhin müsste die stets dem Bewegungssehen übergeordnete Objekterkennung noch stärker vermindert werden, was bei allen Primaten sogar mit *random-dot*-Mustern nahezu unmöglich ist.

Selbst dann wäre die Erfolgsaussicht einer solchen psychophysischen Untersuchung mehr als fraglich, aufgrund der in diesen Versuchen festgestellten und durch die neueren Studien der Arbeitsweise des koniozellulären Weges gefundenen scheinbaren mehrfachen Redundanz des Bewegung detektierenden Systems.

Eine eigene geometrische Struktur auf der Retina speziell für das Bewegungssehen lässt sich nicht nachweisen. Die Rolle der Fovea centralis ist für das Bewegungssehen, wie auch für die gesamte visuelle Wahrnehmung, nur insofern von Bedeutung, dass hier die meisten Ganglienzellen vorhanden sind und damit an dieser Stelle am meisten Information aus dem Netzhautbild gewonnen werden kann.

6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, ausgehend von der Bewegungswahrnehmung des Menschen durch psychophysische Methoden eine mögliche geometrische retinale Struktur der Bewegungswahrnehmung ähnlich der Fovea für räumliche Auflösung mit verschiedenen Mustern zu bestimmen.

Zur Klärung dieser Frage wurde die Induktion von Scheinbewegungen in unbewegten Objekten näher untersucht. Diese Bewegungswahrnehmung muss bei solchen Objekten aus dem detektierenden System selber generiert sein. Die Eigenschaften der zu untersuchenden Bewegungsdetektion sollten dabei durch die Veränderung der Eingangsmuster charakterisiert werden.

Hierzu wurde auf einem PC und einem Videoprojektor eine bewegte, großflächige, geometrisch modifizierbare Reizung benutzt. Durch unterschiedliche psychophysische Versuchsmethoden wurden voneinander differenzierbare Ergebnisse gewonnen. Die Reizmuster wurden dabei im Rahmen der vorhandenen Technik optimiert.

Aufgrund dieser Versuchsmethode konnte das Zusammenspiel von Objekterkennung und Bewegungsdetektion in psychophysischen Versuchen gezeigt werden. Es wurde dabei bestätigt, dass eine Objekterkennung und die Wahrnehmung von Tiefe, auch wenn es sich dabei um Scheintiefe handelt, die differenzierte Bewegungswahrnehmung an sich beeinflussen oder sogar vollständig unterdrücken kann.

Die vergleichende Betrachtung aller Ergebnisse zeigt, dass auch schon bei sehr langsamen Bewegungen mehr als nur ein System mit nur einer geometrischen retinalen Struktur die Bewegung detektieren muss. Diese Systeme lassen sich mit psychophysischen Methoden kaum voneinander trennen.

Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich so heraus, dass die von Rodieck postulierte Hypothese, dass jede visuelle Funktion des Gehirns eine eigene spezifische retinale Struktur aufweist, auf diesen Bereich der Bewegungswahrnehmung nicht direkt übertragen lässt, da sie einerseits der wesentlich genauer

arbeitenden Objekterkennung streng untergeordnet ist und stets mindestens zwei verschiedene Mechanismen diese Art von Bewegung wahrnehmen.

Eine eigene Art von Fovea für die Bewegungswahrnehmung, also einen besonders empfindlichen Bereich für langsame Bewegungen ist mit den untersuchten Scheinbewegungen nicht feststellbar. Dies liegt vor allem an der kaum quantifizierbaren Größe der induzierten Scheinbewegung.

Mit mehr Computerrechenleistung, einem feiner aufgelösten Videoprojektor mit deutlich mehr Kontrast und feineren chromatischen Abstufungen könnte mit der hier angewendeten Methode die Arbeitsweise der an der räumlichen Bewegungswahrnehmung beteiligten subkortikalen Verarbeitungswege mit Hilfe farbiger, geometrisch angepasster Reizmuster eventuell genauer aufgeschlüsselt werden.

7 Anhang: Programmquelltext

Das in allen Versuchen verwendete Java-Applet konnte beliebig an verschiedene Versuche angepasst werden. Es hatte in etwa folgende Struktur:

- Laden der benötigten Systembibliotheken (import) und Festlegen der Variablen.
- Starten des eigentlichen Applets (variabler_stream).
- Initialisierung der unabhängigen Tastaturabfrage.
- Festlegen von Start- und Stopbedingungen.
- Initialisierung des Hauptapplets und der einzelnen Threads.
- Laden eventueller transparenter Grafiken (maximal 2) in den Speicher.
- Definieren einer virtuellen und einer tatsächlichen Bilddarstellung („double buffer“) zum Unterbinden von „zuckender“ Bilddarstellung.
- Definition der Tastaturbelegung für jede erdenkliche Einstellung, sowie „Kurzahltasten“ (1,2,3...-0) für einzelne Versuche.
- Eine weitere mögliche Grafikausgabe zum Ablesen der aktuellen Werte der Variablen („Druck“-Darstellung).
- Eine versuchsabhängige und stets modifizierte Zeichenroutine der virtuellen Zeichnungsfläche, die nach Fertigstellung auf die tatsächliche projiziert wurde. Hierbei wurden entweder maximal zwei transparente Bilddateien (muster.gif) oder ein nach zu wählenden Parametern errechnetes Punktmuster (stream-Modus) gezeichnet. Der unbewegte Punkt konnte sowohl horizontal an verschiedenen Positionen, als Mondsichel oder mit einem Hof dargestellt werden. Ebenso konnte in der Appletmitte ein Zielkreuz eingeblendet werden.
- Eine hochvariable Geschwindigkeitsanpassung, um abhängig von der benötigten Rechenleistung und unabhängig von der Computerhardware ein breites Spektrum an verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten wählen zu können.
- Eine mit Hilfe von „JavaBeans“ realisierte Tastaturabfrage als getrenntes Unterprogramm und eigener Thread.

Auf den folgenden Seiten ist der Quelltext des Versuchsapplets „variabler_stream.java“ mit spezifischen Anpassungen für den Versuch 4.3 „linear“ exemplarisch gezeigt. Nicht benötigte Programmteile ließen sich stets durch Setzen von „//“- , „/*“- und „*/“-Compilermarkern ausblenden. Das Applet versucht stets die GIF-Bilder „muster.gif“ und „muster2.gif“ zu laden und ermittelt automatisch ihre Darstellbarkeit auf der Zeichenfläche, wodurch auch komplex errechnete Grafiken verwendet werden konnten.

```
import java.awt.*;
import java.awt.event.*;
import java.applet.*;
import java.lang.*;

public class variabler_stream extends Applet implements Runnable{
    Thread runner;
    Image Vorlage;
    Image Vorlage2;
    Image Speicherbild;
    Graphics Speichergrafik;
    int x, y, currX, currY, size, key, bildx, bildy, punktx, punkty, Appletsizex, Appletsizey, zoom;
    int x1,y1, a,b,c,act,schalter, wert, wert2, wert3, helpx,helpy,inter, inter2, inter3, inter4, inter5, radius ;
    float rx, ry, px,py,phi,phase,pi,distanzx, distanzzy, distanz ;
    char currKey='A';
    boolean isStandalone=false, druck, taster, stream, mond, sichel, helligkeit, fovea, X;
    double speed;
    string s, t;

    public variabler_stream() {
        try {
            jblnit();
        }
        catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
    }

    public void start() {
        if (runner == null)
        {
            runner = new Thread(this);
            runner.start();
        }
    }

    /* public void stop() {
        if (runner != null)
        {
            runner.stop();
            runner = null;
        }
    } --DEPRECATED daher rausgeworfen */

    public void init() {
        Appletsizex=getSize().width;
        Appletsizey=(getSize().height)-80;
        try { jblnit(); } catch (Exception e) { e.printStackTrace(); }
        Speicherbild=createlImage(Appletsizex,Appletsizey);
        Speichergrafik=Speicherbild.getGraphics();
        Vorlage=getImage(getCodeBase(),"muster.gif");
        Vorlage2=getImage(getCodeBase(),"muster2.gif");
        try { Thread.sleep(2000); }
```

```

catch (InterruptedException e) {}
currX=(int)Math.round(0.5+Appletsizex/2);
currY=(int)Math.round(0.5+Appletsizey/2);
speed=0.02;
rx=25;
ry=25;
px=0;
py=0;
X=false;
zoom=100;
size=40;
s="";
t="";
phase=0;
pi= Math.round(Math.PI);
druck=false;
setBackground(Color.black);
stream=false;
fovea=false;
mond=false;
sichel=false;
helligkeit=false;
schalter=16; //grauwert des Mondes
inter2=100;
inter3=0;
a=0;
act=5;
wert = 0;
}

public void run() {
while (true)
{
for (phi = 0; phi < 2*Math.PI; phi+=speed)
{
if (druck==false) {
x=-((int)Math.round(bildx*zoom/100)/2)+(getSize().width/2)+(int)Math.round(rx*Math.cos(phi));
y=-((int)Math.round(bildy*zoom/100)/2)+(getSize().height/2)+(int)Math.round(ry*Math.sin(-phi));
x1=-((int)Math.round(bildx*zoom/100)/2)+(getSize().width/2);//+(int)Math.round(-rx*Math.cos(phi));
y1=-((int)Math.round(bildy*zoom/100)/2)+(getSize().height/2);//+(int)Math.round(-ry*Math.sin(-phi));
punktX=(int)Math.round(px*Math.cos((phi+phase)));
punktY=(int)Math.round(py*Math.sin(-(phi+phase)));
if (a==getSize().width) {a=0;};
};
if (druck==true) {
s = "";
s = "Geschwindigkeit = "+Math.floor(speed*1000.00)/1000.00;
s +=", s-Muster x="+Math.floor(rx*100.0)/100.0;
s +=", Y="+Math.floor(ry*100.0)/100.0+" s-Punkt x="+Math.floor(px*100.0)/100.0;
s +=", y="+Math.floor(py*100.0)/100.0+" min radius = "+inter2+" max. radius "+inter3;
s +=", zoom(%)= "+Math.floor(zoom*100.0)/100.0;};
s +=", Mondhelligkeit "+schalter+" "+wert3+" "+wert2 ;

repaint();
try { Thread.sleep(20); }
catch (InterruptedException e) {}
}
}
}

private void jblnit() throws Exception{
this.setSize(new Dimension(Appletsizex, Appletsizey));
this.addKeyListener(new variabler_stream_this_keyAdapter(this));
this.setBackground(Color.white);
this.requestFocus();
}

void this_keyPressed(KeyEvent e) {
key = (e.VK_I); /* Irgendeine Taste ohne Sinn einfach - der

```

```

        'taster' = 'true' stoppt die Mehrfache Tastaturabfrage*/
if (taster == false) {key =e.getKeyCode();}

if (key == (e.VK_G)){
    if (zoom>2) zoom-=1;};

if (key ==(e.VK_Z)){
    a+=100;}; //schiebt im stream-modus Punktmuster nach rechts
if (key ==(e.VK_U)){
    a-=100;};
    if (key ==(e.VK_O)){
        if (X == true){X=false;}
        else {X=true;};}
if (key ==(e.VK_H)){
    if (zoom<100) zoom +=1;};
if (key ==(e.VK_UP)){
    currY-=1;};
if (key ==(e.VK_DOWN)){
    currY+=1;};
if (key ==(e.VK_LEFT)){
    currX-=1;};
if (key ==(e.VK_RIGHT)){
    currX+=1;};
if (key ==(e.VK_PAGE_UP)){
    speed+=0.001;};
if (key ==(e.VK_PAGE_DOWN)){
    speed-=0.001;};
if (key ==(e.VK_HOME)){
    ry+=5;};
if (key ==(e.VK_END)){
    ry-=5;};
if (key ==(e.VK_INSERT)){
    rx+=5;};
if (key ==(e.VK_DELETE)){
    rx-=5;};
if (key ==(e.VK_ADD)){
    size+=1;};
if (key ==(e.VK_PLUS)){
    act+=1;};
if (key ==(e.VK_MINUS)){
    act-=1;};
if (key ==(e.VK_SUBTRACT)){
    if (size>=1){
        size-=1;};};
if (key ==(e.VK_Q)){
    px+=1;};
if (key ==(e.VK_A)){
    size+=1;
    zoom=2*size;};
if (key ==(e.VK_S)){
    if (size>0){size-=1;
    zoom=2*size;};};
if (key ==(e.VK_X)){
    px+=1;
    py+=1;
/* if (px == 0) {if (px == py) {px = 1; py = 1;};};*/ //erzwungene Minimalbewegung, falls erwünscht
};
if (key ==(e.VK_Y)){
    px-=1;
    py-=1;
/* if (px == 0) {if (px == py) {px = -1; py = -1;};};*/
};
if (key ==(e.VK_W)){
    px-=1; };
if (key ==(e.VK_E)){
    py+=1;};
if (key ==(e.VK_D)){
    py-=1;};
if (key ==(e.VK_C)){

```

```
    phase+=Math.PI/32;};
if (key ==(e.VK_V)){
    phase-=Math.PI/32;};

if (key ==(e.VK_1)){
    X=false;
    speed=0.02;
    rx=25;
    ry=25;
    px=0;
    py=0;
    zoom=100;
    size=40;
    s="";
    phase=0;
    pi= Math.round(Math.PI);
    druck=false;
    stream=false;
    mond=false;
    sichel=false;
    heiligkeit=false;
    a=0; //
    act=5; //featuregroesse 5 bei sichel/hof des Mondes
    schalter=16; //Mond=Schneeweiss
};

if (key ==(e.VK_2)){
    currX=(getSize().width/2);
    currY=(getSize().height/2);
    speed=0.01;
    rx=25;
    ry=25;
    px=0;
    py=0;
    zoom=100;
    size=50;
    wert=8; //mond schneeweiss bei punktgroesse 8 !
    s="";
    phase=0;
    X=false;
    pi= Math.round(Math.PI);
    druck=false;
    stream=true;
    fovea=true;
    mond=false;
    sichel=false;
    X=false;
    heiligkeit=true;
    a=0; //
    act=5; //featuregroesse 5 bei sichel/hof des Mondes
    schalter=16; //Mond=Schneeweiss
};

if (key ==(e.VK_3)){
    if (currX>=(getSize().width/2)-200)
    {currX-=100;}
    else {currX=(int)Math.round((getSize().width/2));};
    currY=(getSize().height/2);
    speed=0.01;
    rx=25;
    ry=25;
    px=0;
    py=0;
    zoom=100;
    size=50;
    wert=8; //Mond schneeweiss bei Punktgröße 8 !
```



```

s="
phase=0;
pi= Math.round(Math.PI);
druck=false;
stream=true;
fovea=true;
mond=false;
sichel=false;
helligkeit=true;
//X=true;
a=0; //
act=5; //featuregroesse 5 bei sichel/hof
schalter=16; //mond=weiss
};

if (key ==(e.VK_4)){
    speed=-1*speed;
};
if (key ==(e.VK_6)){
    if (size>5){size-=5;
    zoom=2*size;
    speed=-1*speed;};
if (key ==(e.VK_0)){
    if (zoom>=20){zoom -=10;
    speed=-1*speed;};};
if (key ==(e.VK_8)){
    if (size>10){size -=10;
    speed=-1*speed;};};
if (key ==(e.VK_J)){
    currX=(getSize().width/2);
    currY=((getSize().height)/2);
    if (fovea==false){
    stream=true;
    fovea=true;}
    else {fovea=false;}
};
if (key ==(e.VK_T)){
    currX=(getSize().width/2);
    currY=((getSize().height)/2);
    if (fovea==false){
    fovea=true;
    if (stream==false) {
        stream=true;};
    }
    else {fovea=false;
    stream=false;};
};
if (key ==(e.VK_L)){
    if (schalter<=16) {schalter+=1;}; //Grauwert des Mondes
    if (schalter>=17) {schalter=1;};
};
if (key ==(e.VK_M)){
    if (mond==false){
        mond=true;
        if (helligkeit==true) {helligkeit=false;}
        if (sichel==true) {sichel=false;}}
    else {mond=false;};
};

if (key ==(e.VK_N)){
    if (sichel==false){
        sichel=true;
        if (helligkeit==true) {helligkeit=false;}
        if (mond==true) {mond=false;}}
    else {sichel=false;};
};

if (key ==(e.VK_B)){
    if (helligkeit==false){

```

```

        heiligkeit=true;
        if (mond==true) {mond=false;}
        if (sichel==true) {sichel=false;}
    else {heiligkeit=false;};
    if (size>0){wert = size;};
};
if (key ==(e.VK_P)){
if (druck==false){
    druck=true;
else {druck=false;};
};
taster=true;
repaint();
inter2=100;
inter3=0;
}

public void update(Graphics g) {
    paint(g);
}

public void paint(Graphics g) { //allgemeine Schwärzung der Appletfläche
    bildx = Vorlage.getWidth(this);
    bildy = Vorlage.getHeight(this);
    Speichergrafik.setColor(Color.black);
    Speichergrafik.fillRect(0,0,Appletsizex,Appletsizey);
    Speichergrafik.setColor(new Color((schalter*16-1),(schalter*16-1),(schalter*16-1)));
    Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx,currY-size+punkty,(2*size),(2*size));
/* if (X==true) {
    Speichergrafik.setColor(Color.white);
    inter4=(int)Math.round(getSize().width/2);
    inter5=(int)Math.round(getSize().height/2);
    Speichergrafik.drawLine(inter4-5+300,inter5, inter4+5+300, inter5);
    Speichergrafik.drawLine(inter4+300,inter5-5, inter4+300, inter5+5);
    } else {
    Speichergrafik.setColor(Color.white);
    inter4=(int)Math.round(getSize().width/2);
    inter5=(int)Math.round(getSize().height/2);
    Speichergrafik.drawLine(inter4-5,inter5, inter4+5, inter5);
    Speichergrafik.drawLine(inter4,inter5-5, inter4, inter5+5);
    }
Kein Zielkreuz erforderlich */
/* if (mond==true) {
    bildx = Vorlage.getWidth(this);
    bildy = Vorlage.getHeight(this);
    Speichergrafik.setColor(Color.darkGray);
    Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx-(3*act),currY-size+punkty-(3*act),(2*size)+(6*act),(2*size)+(6*act));
    Speichergrafik.setColor(Color.gray);
    Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx-(2*act),currY-size+punkty-(2*act),(2*size)+(4*act),(2*size)+(4*act));
    Speichergrafik.setColor(Color.lightGray);
    Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx-(act),currY-size+punkty-(act),(2*size)+(2*act),(2*size)+(2*act));
    Speichergrafik.setColor(Color.white);
    Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx,currY-size+punkty,(2*size),(2*size));
    if (heiligkeit==true){
        bildx = Vorlage.getWidth(this);
        bildy = Vorlage.getHeight(this);
        if (size<=wert) {if (size>0){wert=size;
            schalter=16;}};
        if (size>0) {wert2=(int)Math.round(255*wert/wert/(size*size));
            wert3=(int)Math.round((Math.sqrt((0.0236*0.0236/(4*0.0007*0.0007))-((0.4043-
            ((39.9038)*wert*wert/(size*size)))/0.0007)))+(0.0236/0.0007));};
// Wert3 wird auf die Regressionsgrade der Leuchtdichte in Abhängigkeit vom Grauwert normiert, pq-Formel
        if (wert3>255){wert3=255;}
        Speichergrafik.setColor(new Color(wert3,wert3,wert3));
        Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx,currY-size+punkty,(2*size),(2*size));
    }
    if (sichel==true){
        bildx = Vorlage.getWidth(this);
        bildy = Vorlage.getHeight(this);

```

```

    Speichergrafik.setColor(Color.black);
    Speichergrafik.fillOval(currX-size+punktx-act,currY-size+punkty,(2*size),(2*size));
}
kein Mond erforderlich */

    if (stream==false) {
        Speichergrafik.drawImage(Vorlage2,-25+punktx, -105+punkty, this);
        Speichergrafik.drawImage(Vorlage, x, y, (int)Math.round(bildx*zoom/100), (int)Math.round(bildy*zoom/100), this);
        c = (int)Math.round((2*currX/(bildy*zoom/100))+1); //Wie oft passt das „muster.gif“ auf den Applet-Schirm? So oft wird's auch
gezeichnet!
        for ( int i = -c; i <= c; i++){
            for ( int n = -c; n <= c; n++){
                Speichergrafik.drawImage(Vorlage, x-(i*(int)Math.round(bildx*zoom/100)), y+n*(int)Math.round(bildy*zoom/100),
(int)Math.round(bildx*zoom/100), (int)Math.round(bildy*zoom/100), this);
            }
        }
    }
    else { //zeichenroutine für linearen 'fluss' also für einfachere Muster
        if (speed>0.001){
            if ((int)Math.round((1/speed)*0.5)>300){
                try { Thread.sleep(500); //geschwindigkeitsangepasst
                    a+=1;}
                catch (InterruptedException e) { }
            }
            try { Thread.sleep((int)Math.round((1/speed)*0.5)); //geschwindigkeitsangepasst
                a+=1;}
            catch (InterruptedException e) { }
            if ((int)Math.round((1/speed)*0.5)<5)
                {a+=(int)Math.round(speed*10); }
        };
        if (speed<-0.001){
            if ((int)Math.round((-1/speed)*0.5)>300){
                try { Thread.sleep(500); //geschwindigkeitsangepasst
                    a-=1;}
                catch (InterruptedException e) { }
            }
            try { Thread.sleep((int)Math.round((-1/speed)*0.5)); //geschwindigkeitsangepasst
                a-=1;}
            catch (InterruptedException e) { }
            if ((int)Math.round((-1/speed)*0.5)<5)
                {a-=(int)Math.round(-speed*10); }
        };
        if (speed<0.001) {
            if (speed>-0.001) { };
        };
    }
    if (fovea==false){
        if (a==(int)Math.round(bildx*zoom/100)) {a=0;}; //bei jedem vielfachen von Bildbreite/100*zoom wird a wieder genullt.
        if (a==(int)Math.round(bildx*zoom/100)) {a=0;};
        if ((a/(int)Math.round(bildx*zoom/100))>1) {a-=(int)Math.round(bildx*zoom/100);}; //fließende Übergänge, trotz zoomen
        if ((a/(int)Math.round(bildx*zoom/100))<-1) {a+=(int)Math.round(bildx*zoom/100);};
    }

    b=currY-(int)Math.round(bildy*zoom/200);
    c = (int)Math.round((2*currX/(bildx*zoom/100))+2);
        for ( int i = -c; i <= c; i++){

            for ( int n = -c; n <= c; n++){

                Speichergrafik.drawImage(Vorlage, a-i*(int)Math.round(bildx*zoom/100), b+n*(int)Math.round(bildy*zoom/100),
(int)Math.round(bildx*zoom/100), (int)Math.round(bildy*zoom/100), this);
            }
        }
    }
    if (fovea==true){
        if (a>=(int)Math.round(4*zoom)) {a=0;}; //bei jedem vielfachen der Musterbreite(=400)/100*zoom wird a wieder genullt.
        if (a<=(int)Math.round(4*zoom)) {a=0;};
        if ((a/(int)Math.round(4*zoom))>1) {a-=(int)Math.round(4*zoom);}; //fließende Übergänge, trotz zoomen
        if ((a/(int)Math.round(4*zoom))<-1) {a+=(int)Math.round(4*zoom);};
        b = (int)Math.round(((2*Appletsizex+(4*zoom))/(4*zoom))+1);
        c = (int)Math.round(((4*Appletsizex)/(4*zoom))+1);
        inter=(int)Math.round(Math.sqrt((Appletsizex/2)*(Appletsizex/2)+(Appletsizex/2)*(Appletsizex/2))+0.5); //inter ist der größtmögliche
abstand.
    }
}

```

```

t="";
t="Inter = "+inter;
//t+=" Radius bei 0= "+(int)Math.round((0.5*zoom));
//t+=" Radius bei 200= "+(int)Math.round((0.5*((200/inter)*zoom)+0.5*zoom));
//t+=" Radius bei 300= "+(int)Math.round((0.5*((300/inter)*zoom)+0.5*zoom));
    int helpz=(int)Math.round(Appletsizy-((Appletsizy/(4*zoom)+1)*4*zoom)+2*zoom);
    while (helpz<2*zoom)
        {helpz+=2*zoom;}; //Bildschirmgröße stets abziehen ergibt "Überstand" von Bildschirmhälfte,
        helpz-=zoom;
// Stream trifft um zoom versetzt stets mittig auf Mond, jetzt können über die Bildschirmfläche alle Musterpunkte gezeichnet werden

    for ( int i=0; i<=c; i++ ){
        for ( int n = 0; n<=b; n++ ){
            helpy=(int)Math.round(helpz+(-Appletsizy/2)+4*(n*zoom+(0.5)*zoom));
            helpx=(int)Math.round(-(-2*Appletsizex)+a+4*((i*zoom)+(0.5)*zoom));
            int m=0; //Läuft 2x, da auch für versetzten punkt!
            while ( m<=1) {

                //zeichnet Punkte, versetzt Punkte, berechnet und zeichnet

                distanz=(float)Math.round(helpy-(Appletsizy/2));
                distanzx=(float)Math.round(helpx-(Appletsizex/2));
                //Abstandsberechnung nach Pythagoras:
                distanz=(int)Math.round(Math.sqrt(distanzx*distanzx+distanzy*distanzy)+0.5);
                //Distanz ist der Abstand des zu zeichnenden Kreispunktes vom Appletmittelpunkt
                //radius=(int)Math.round(0.5*(0.5*((distanz/inter)*zoom)+0.5*zoom)); // linear normiert von halber Größe zu max. Größe
                //das ist von der Novembermessung
                if (distanz>400){radius=(int)Math.round(0.5*zoom);}
                else {radius = (int)Math.round(0.5*((distanz)*zoom)/400);};
                //radius=(int)Math.round(((distanz/inter)*zoom));
                if (inter2>=radius) {inter2=radius;};
                if (inter3<=radius) {inter3=radius;};
                Speichergrafik.setColor(new Color((153),153,153));
//grau mit 13,5 cd/m2
                Speichergrafik.fillOval(helpx-radius,helpy-radius,2*radius,2*radius);
                helpy+=(int)Math.round(zoom*2);//die alten werte nochmal um zoom*2 versetzt durchgejagdt
                helpx+=(int)Math.round(zoom*2);
                m+=1;
            }
            //radius ist der zu zeichnende Radius des Punktes in Abhängigkeit von distanz
        }
    }
}
if (druck==true){ // Ausgabe der eingestellten Werte
    Speichergrafik.setColor(Color.white);
    Speichergrafik.fillRect(0,0,Appletsizex,Appletsizy);
    Speichergrafik.setColor(Color.blue);
    Speichergrafik.drawString(s,(int)Math.round(Appletsizex/10),(int)Math.round(Appletsizy/2));
    Speichergrafik.drawString(t,(int)Math.round(Appletsizex/10),(int)Math.round(Appletsizy/2)+20);
    Speichergrafik.setColor(Color.black);
};
g.drawImage(Speicherbild,0,0,this);
taster = false;
}
} //Ende des Applets

/* zweites Applet als Unterprogramm zum Starten einer vom Hauptprogramm unabhängigen Tastaturabfrage*/

class variabler_stream_this_keyAdapter extends java.awt.event.KeyAdapter {
    variabler_stream adaptee;

    variabler_stream_this_keyAdapter(variabler_stream adaptee) {
        this.adaptee = adaptee;
    }

    public void keyPressed(KeyEvent e) {
        adaptee.this_keyPressed(e);
    }
}

```

8 Literaturverzeichnis

- Anstis, S., Factors affecting footsteps, contrast can change the apparent speed, amplitude and direction of motion. *Vision Research* 2004, Volume 44, Ausgabe 18, S. 2171-2178
- Bonneh, Cooperman, Sagi, motion induced blindness in normal observers. *letters to nature, nature*, Vol. 411, Juni 2001, S. 798-801
- v. Campenhausen, C., *Die Sinne des Menschen*. Thieme Verlag Stuttgart, 2. Auflage, ISBN 3136033027, Januar 1993
- Coren, S., Subjective contours and apparent depth. *Psychological Review* 1972, Vol. 79, No. 4, S. 359-367
- Dacey M. D., Petersen M. R., Dendritic field size and morphology of midget and parasol ganglion cells of the human retina. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA Neurobiology*, Vol. 89, S. 9666 ff., Oktober 1992.
- Goodale M. A., Milner A. D., Separate visual pathways for perception and action. *Trends In Neurosciences*. Januar 1992;15(1),20-5
- Hesse, R., *Psychophysische Untersuchungen der räumlichen Struktur der Retina mit Hilfe des Foveaphänomens*. Diplomarbeit, Universität Mainz, Januar 2002
- Hoffmann M., Dorn T., Bach M., Time course of motion adaptation, Motion onset visual evoked potentials and subjective estimates. *Vision Research* 1999, Ausgabe 39, S. 437-444
- Kaufman L., Kaufman J. H., Explaining the moon illusion. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Januar 2000 4;97(1), S. 500-505.
- Martin P. R., White A. J., Goodchild A. K., Wilder H. D., Sefton A. E., Evidence that blue-on cells are part of the third geniculocortical pathway in primates. *European Journal of Neuroscience*, Juli 1997; 9(7), S.1536-1541.
- Morand, Thut et al., Electrophysiological Evidence for Fast Visual Processing through the Human Koniocellular Pathway when Stimuli Move. *Cerebral Cortex*, Vol. 10, August 2000, No. 8, S. 817-825
- Nieder A., Wahrnehmung von Scheinkonturen – Wie sich das Gehirn Illusionen macht. *Neuroforum* 3/02, März 2002, S. 210-217
- Rivest J, Cavanagh P., Localizing contours defined by more than one attribute. *Vision Research* 1996; Volume 36, Ausgabe 1, S. 53-66
- Rock I., Anson R., Illusory contours as the solution to a problem, *Perception*. 1979; 8(6), S. 665-681

-
- Rodieck R. W., *The First Steps In Seeing*. Sinauer Associates; erste Auflage, ISBN 0878937579, 15. Januar 1998
- Ruppertsberg A.I., Wuergler S.M., Bertamini M., The chromatic input to global motion perception. *Visual Neuroscience*. Juli-August 2003 20(4), S. 421-428.
- Sincich L. C., Park K. F., Wohlgenuth M. J., Horton J. C., Bypassing V1 – a direct geniculate input to Area MT. *Nature Neuroscience*. Oktober 2004;7(10), S. 1123-1128.
- Seghier, et. al., Moving illusory contours activate primary visual cortex - an fMRI study. *Cerebral Cortex*. Juli 2000; 10(7), S. 663-670.
- Vitten C., Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eines Bewegungsdetektors auf der Basis von Zapfenerregungen beim Menschen. Promotionsarbeit, Universität Mainz, Mai 2004