



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik
Institut für Technische Informatik und Mikroelektronik
Computational Psychology

Ist das visuelle System des Menschen empfindlicher für Kanten oder Luminanzunterschiede?

eingereicht von Savas Großmann
Matrikelnummer 382619

Erstprüferin Prof. Dr. Marianne Maertens
Zweitprüfer Prof. Dr. Felix Wichmann

24. Juli 2023

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den 21.07.2023

Savas Großmann
Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Maertens dafür bedanken, dass ich die Gelegenheit hatte, meine Bachelorarbeit an ihrem Lehrstuhl zu verfassen. Ihre wertvollen Hilfestellungen und Tipps haben sehr geholfen beim Verfassen dieser Thesis. Ebenso möchte ich Lynn Schmittwilken meinen Dank aussprechen, da sie mich intensiv in allen Aspekten meiner Arbeit unterstützt hat - angefangen bei dem Experiment bis hin zur vollendeten Arbeit. Ihre Unterstützungen und Beiträge haben maßgeblich dazu beigetragen, dass diese Arbeit zu einer bereichernden und erfolgreichen Erfahrung wurde. Zusätzlich möchte ich mich bei allen Proband*innen herzlich dafür bedanken, dass sie an meinem Experiment teilgenommen haben.

Zusammenfassung

Die Fähigkeit des Menschen zu sehen, ist einer der zentralen und wichtigsten Sinne des Menschen. Mit diesem können wir uns in der Umwelt zurechtfinden und Gegenstände und Objekte ohne Probleme erkennen. Doch obwohl dieser Sinn so zentral für Menschen ist, gibt es noch sehr viele unbeantwortete Fragen. Eine dieser Fragen bezieht sich auf zwei verschiedene Reize, die vom Sehsinn aufgenommen werden: Kanten und Helligkeiten.

In meiner Bachelorarbeit überprüfe ich, ob das visuelle System des Menschen sensitiver auf einen dieser beiden Reize reagiert. Das heißt, Menschen sind besser darin, entweder Kanten oder Helligkeiten wahrzunehmen. Außerdem wird geprüft, ob einer diesen beiden Reize den anderen bedingt. Um diese Fragen zu beantworten, führe ich ein Experiment zur Helligkeitswahrnehmung durch, in dem die Proband*innen verschiedene Polaritäten richtig zuordnen müssen. Diese Werte vergleiche ich mit einem Kantenexperiment aus Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung), um die Fragestellung zu beantworten.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Proband*innen weniger Probleme hatten beim Kantenedetektionsexperiment. Mit dem Vergleich der Daten konnte die Vermutung bestätigt werden, dass Menschen empfindlicher für Kanten als für Helligkeiten beziehungsweise Luminanzunterschiede sind. Außerdem kann man, dank der Ergebnisse, davon ausgehen, dass die Wahrnehmung der Kanten die Wahrnehmung von Helligkeiten bedingt.

Abstract

The human ability to see is one of the central and most important senses of humans. With this sense we can find our way in the environment and recognize objects without any problems. However, although this sense is so central to humans, there are still many unanswered questions. One of these questions relates to two different stimuli that are picked up by the sense of sight: Edges and Brightness.

In my bachelor thesis I check if the human visual system is more sensitive to one of these two stimuli. That means humans are better at perceiving either edges or brightness. Furthermore, I test whether one of these two stimuli conditions the other. To answer these questions, I conduct an experiment on brightness perception in which the subjects have to correctly assign different polarities. I compare these values with an edge experiment from Schmittwilken & Maertens (in progress) to answer the question.

The results showed that the subjects had less problems with the edge detection experiment. The comparison of the data confirmed the assumption that people are more sensitive to edges than to brightness or luminance differences. Furthermore, thanks to the results, it can be assumed that the perception of edges conditions the perception of brightness.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Begriffsdefinitionen | 1 |
| 1.1.1 | Kanten und Helligkeiten | 1 |
| 1.1.2 | Luminanz und Kontrast | 3 |
| 1.2 | Fragestellung | 5 |
| 1.3 | Hypothese | 6 |
| 1.4 | Ausblick und Zusammenfassung | 7 |
| 2 | Methode des Kantenexperiments | 8 |
| 2.1 | Studiendesign | 8 |
| 2.1.1 | Stimuli | 8 |
| 2.1.2 | Versuchsaufbau | 12 |
| 2.2 | Versuchsablauf | 12 |
| 2.3 | Ergebnisse | 14 |
| 2.4 | Bedeutung für die Fragestellung | 15 |
| 3 | Methode des Polaritätsexperiments | 16 |
| 3.1 | Studiendesign | 16 |
| 3.1.1 | Stimuli | 16 |
| 3.1.2 | Versuchsaufbau und Ablauf | 17 |
| 3.2 | Ergebnisse | 17 |
| 4 | Vergleich der Experimente | 19 |
| 4.1 | psychometrische Funktionen | 19 |
| 4.2 | Schwellenwerte | 21 |
| 4.2.1 | statistische Überprüfung | 22 |
| 5 | Diskussion | 24 |
| 5.1 | Limitationen | 26 |
| 5.2 | Fazit | 27 |
| | Literaturverzeichnis | 29 |
| | Appendix | 31 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Kanten und Helligkeiten bei einem Beispielbild | 2 |
| 2 | Luminanzunterschiede inkl. Luminanzprofile | 3 |
| 3 | Cornsweet-Kanten | 9 |
| 4 | Arten von Rauschen | 10 |
| 5 | Stimuli der beiden Experimente | 11 |
| 6 | Beispielstimulus aus dem Experiment | 13 |
| 7 | Kontrastschwellen Kantendetektionsexperiment | 15 |
| 8 | Kontrastschwellen Polaritätsexperiment | 18 |
| 9 | psychometrische Funktionen beide Experimente | 20 |
| 10 | Kontrastschwellen beide Experimente | 21 |
| 11 | Appendix 1: psychometrische Funktionen Kantendetektionsexperiment . . | 31 |
| 12 | Appendix 2: psychometrische Funktionen Polaritätsexperiment | 32 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Ergebnisse der ANOVA | 22 |
| 2 | Tukey Post-Hoc-Test für die Cornsweet-Kanten | 23 |

Kapitel 1

Einleitung

Der Mensch hat fünf verschiedene Sinne, mit denen er die Informationen aus unserer Umwelt aufnehmen kann. Jeder dieser Sinne trägt dazu bei, dass wir mit unserer Umwelt interagieren können. Dieser Prozess wird Wahrnehmung genannt.

Zu diesen Sinnen zählt auch der Sehsinn. Dieser sorgt dafür, dass die Umgebung visuell aufgenommen und die Informationen von der Netzhaut bis zum Gehirn weitergeleitet werden. Das Gehirn kann diese Daten dann verarbeiten und die wichtigsten Informationen über die gesehene Umwelt identifizieren und im Gehirn abspeichern. Diese Fähigkeit wird als visuelle Wahrnehmung bezeichnet. Die visuelle Wahrnehmung spiegelt also unsere Fähigkeit wider, optische Reize aufzunehmen und zu verarbeiten.

Der Teil des Körpers, welcher für diesen Vorgang zuständig ist, wird als das visuelle System des Menschen bezeichnet. Auch wenn alle fünf Sinne eine wichtige Rolle für uns spielen, wird der Sehsinn von den meisten Menschen als wichtigster gewertet und als der Sinn bezeichnet, welchen sie am wenigsten verlieren wollen (Enoch et al., 2019).

1.1 Begriffsdefinitionen

1.1.1 Kanten und Helligkeiten

Jedes von unserem Auge erfasste Objekt besitzt individuelle visuelle Merkmale beziehungsweise Eigenschaften. Diese helfen unserem Gehirn dabei, sie voneinander zu unterscheiden. Die visuellen Eigenschaften sind somit entscheidend für die Wahrnehmung und das Verständnis der Umgebung durch den Menschen. In meiner Thesis möchte ich mich auf zwei dieser visuellen Eigenschaften konzentrieren: die Wahrnehmung von Kanten sowie die Helligkeitswahrnehmung. Diese beiden Merkmale von Objekten sind eng miteinander verbunden. Wie Eng möchte ich im Laufe meiner Thesis herausfinden.

In Abbildung 1 kann man einige Zellen unter einem Mikroskop sehen. Jede der Zellen sieht aus wie ein Kreis. Dank der Kanten können wir die einzelnen Zellen voneinander unterscheiden, selbst wenn diese nah beieinander sind und sogar wenn sich Teile überlappen. In der Abbildung können wir auch eine gut wahrnehmbare Helligkeit feststellen. Aufgrund der Unterschiede in der Helligkeit zwischen den Zellen und dem Hintergrund sind alle Informationen im Bild leicht zu erkennen. Das Auge kann sogar geringfügige Unterschiede in der Helligkeit wahrnehmen, wie beispielsweise beim Übergang vom Rand der Zelle zum Mittelpunkt. Sowohl Kanten als auch Helligkeiten sind hier gut erkennbar und helfen uns dabei einzelne Zellen ohne Probleme ausfindig zu machen, sie voneinander zu differenzieren und vom Hintergrund abzugrenzen.

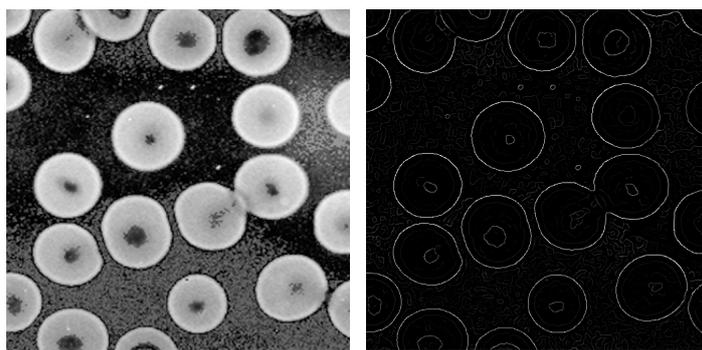


Abbildung 1: Zellen unter einem Mikroskop. Rechts wurden mit Canny-Algorithmus (Canny, 1986) die Ränder der Zellen gefunden und markiert.

Kanten sind allgegenwärtig in unserer Welt, sei es in der Natur, auf Bildern oder bei anderen Dingen. Sie tragen dazu bei, dass Menschen die Grenzen von unter anderem Objekten wahrnehmen können und hilft bei Handlungen wie beispielsweise das Greifen oder Umgehen von diesen Objekten (Yang et al., 2022). In einem Bild oder einem Stimulus kann man eine Kante als Helligkeitssprung definieren, welcher entlang einer spezifischen Achse verläuft. Oder auch ein Bereich im Bild, bei welcher sich die Helligkeit oder Farbe von einer Region zur nächsten abrupt verändert (Hesse & Georgeson, 2005; Yang et al., 2022). Dabei ist es egal, ob diese zwei Bereiche nebeneinander oder weiter voneinander entfernt sind (zum Beispiel Vorder- und Hintergrund eines Bildes). Am Beispiel aus Bild 1 kann man gut sehen, wie jede der Zellen Kanten hat und diese dafür sorgen, dass wir sie voneinander trennen können.

Der Begriff Helligkeit ist eine Eigenschaft des Sehsinns und beschreibt die wahrgenommene achromatische Farbe eines Objekts, auch Graustufe genannt (Betz, 2016). Für das Auge ist die Helligkeit höher bei einem Objekt, wenn die Lichtintensität stärker ist und geringer im umgekehrten Fall. Wenn wir uns eine beliebige Zelle aus Abbildung 1 anschauen, sehen wir, dass immer ein Übergang zwischen Dunkel und Hell existiert vom Hintergrund zur Zelle. Bei einem Übergang wie diesem nehmen wir einerseits immer mindestens zwei verschiedene Helligkeiten und andererseits, falls dieser Übergang abrupt genug ist, auch eine Kante wahr. Es stellt sich die Frage, welcher der beiden Reize dafür verantwortlich ist den anderen sichtbar zu machen. In meiner Thesis beabsichtige ich zu untersuchen, ob die beiden perzeptuellen Eigenschaften von Objekten voneinander abhängen und sich gegenseitig beeinflussen. Konkret möchte ich herausfinden, ob die Wahrnehmung von Kanten eine Voraussetzung dafür ist, dass wir zwei unterschiedlich helle Bereiche wahrnehmen oder ob die Wahrnehmung dieser zwei Bereiche dazu führt, dass wir eine Kante erkennen können. Um diese Frage zu beantworten können, werde ich versuchen herauszufinden für welchen perzeptuelle Eigenschaft der Mensch empfindlicher reagiert.

1.1.2 Luminanz und Kontrast

Zwei Begriffe, die in der Thesis häufig auftreten und für das Verständnis wichtig sein werden, sind Luminanz und Kontrast. Um den Zusammenhang zwischen Helligkeitswahrnehmung und Kantenwahrnehmung zu untersuchen, werde ich ein Experiment durchführen. Die meisten Experimente verwenden einen vereinfachten Stimulus, da dieser besser kontrollierbar ist als natürliche Bilder, wie zum Beispiel in Abbildung 1 dargestellt. Der Vorteil in der Verwendung eines solchen Stimulus beziehungsweise Bildes besteht darin, dass sie so gestaltet werden können, dass sie den Anforderungen eines jeden Experiments entsprechen. Abbildung 2 zeigt drei verschiedene Stimuli, von denen jeder aus zwei Bereichen mit unterschiedlicher Helligkeit besteht. Bei der Betrachtung dieser Stimuli nimmt das Auge links eine dunklere und rechts eine hellere Seite wahr.

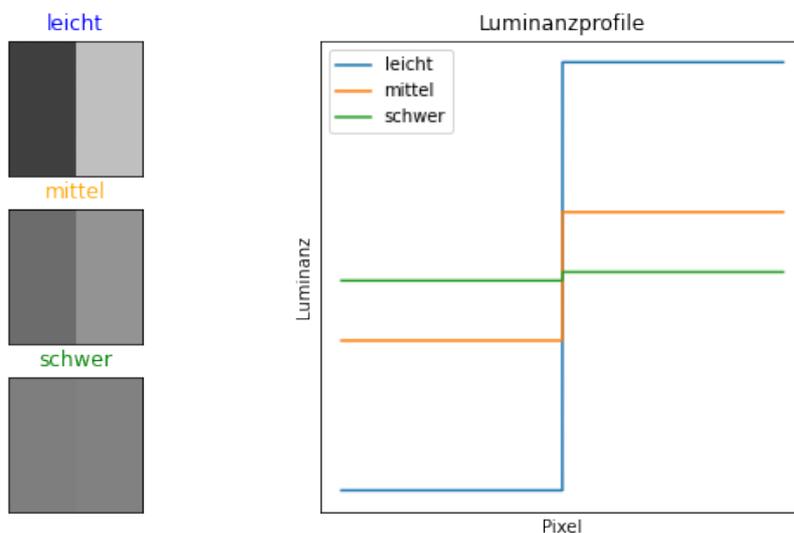


Abbildung 2: Drei verschiedene Kanten mit unterschiedlichen Luminanzen. In den ersten beiden Bildern sollte es für die meisten Menschen einfach sein, die Kante zu erkennen. Da der Kontrast des letzten Bilds sehr gering ist, wird es hier schwerer etwas auszumachen. Der Graph zeigt jeweils einen waagerechten Schnitt durch die drei Stimuli.

Die perzeptuelle Eigenschaft beziehungsweise Wahrnehmung der Helligkeit ist subjektiv von Mensch zu Mensch. Das heißt, selbst wenn verschiedene Personen das gleiche Objekt betrachten, kann es sein, dass sie Dinge wie die Helligkeit, Farben etc. unterschiedlich wahrnehmen. In Experimenten benutzen wir ein Maß, welches sich Luminanz nennt. Die Luminanz beschreibt die physikalische Lichtintensität, die von dem Objekt an jeder Stelle ausgeht. Somit wird dessen Leuchtkraft charakterisiert. Also die Menge an sichtbarem Licht, welches von einer Oberfläche reflektiert wird und auf das Auge trifft (Adelson, 2000; Betz, 2016). Gemessen wird diese in Candela pro Quadratmeter (cd/m^2). In Abbildung 2 kann man am Graph sehen, wie die Luminanz in den drei Stimuli aussieht. Am Beispiel des obersten Stimulus ist erkennbar, dass die linke Seite sehr dunkel ist und somit die wahrgenommene Helligkeit gering ist. Dieser Bildbereich weist eine niedrige Luminanz

auf. Im Gegensatz dazu besitzt der rechte Bereich eine höhere Helligkeit und hat ebenfalls eine höhere Luminanz als sein Gegenüber. Den Übergang von der hellen zur dunklen Seite lässt sich sowohl in der Mitte des Graphen als auch in der Mitte des Stimulus deutlich erkennen. So eine abrupte Veränderung in der Luminanz nennen wir Luminanzsprung (Betz, 2016).

Um zu beschreiben, wie groß dieser Luminanzsprung tatsächlich ist, benutzen wir den Begriff Kontrast. In einem Stimulus oder Bild bezieht sich der Kontrast auf das Verhältnis in der Luminanz zwischen zwei oder mehr benachbarten Regionen (Betz, 2016; Owsley, 2003). Um einen Kontrast zu messen, können verschiedene Verfahren genutzt werden. Im ersten Stimulus in Abbildung 2 ist der Kontrast sehr hoch. Im dritten Stimulus hingegen sind die Luminanzen so ähnlich, dass es fast unmöglich ist, einen Unterschied wahrzunehmen. Hier liegt ein niedriger Kontrast vor. Generell gilt also, wenn ein Stimulus hohe Luminanzunterschiede bzw. Luminanzsprünge aufweist, ist der Kontrast ebenfalls höher. Infolgedessen sollte auch der wahrgenommene Helligkeitsunterschied bei den meisten Menschen größer sein. Wie vorher erwähnt treten Kanten in Bildern auf, wenn es einen Sprung von Luminanzen gibt, so entsteht immer eine Kante im Stimulus, wenn auch ein Kontrast existiert (Hesse & Georgeson, 2005). Je höher der Kontrast, desto besser sichtbar auch die Kante. Die Kante im ersten Stimulus von Abbildung 2 kann man leicht erkennen. Schwerer wird es, wenn wir uns den dritten Stimulus anschauen. Der Kontrast ist sehr gering und somit auch die Erkennbarkeit der Kante und des Helligkeitsunterschieds.

Fällt es uns leichter in Abbildung 2 zu sehen, dass es zwei unterschiedlich helle Bereiche gibt oder dass es zwischen den Bereichen eine Kante gibt? Benutzen wir einen der Reize um den anderen wahrzunehmen oder nehmen wir beide getrennt voneinander auf? Wie die Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit genau lautet und wie diese hergeleitet wurde, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

1.2 Fragestellung

Es gibt bereits viele verschiedene Algorithmen, welche Kanten in Bildern entdecken können. Zum Beispiel in der Kantenerkennung von Canny (1986) wird mit verschiedenen Funktionen und Berechnungen ein Bild bearbeitet, um dann damit die Kanten bestimmen zu können. Ein Beispiel, wie ein solches Bild mit Kanten aussieht, kann man in Abbildung 1 sehen. Neben diesem gibt es auch noch sehr viele andere Algorithmen, welche Kanten entdecken können, unter anderem zum Beispiel mit Deep Learning (Xie & Tu, 2015) oder dem Sobel-Operator (Kanopoulos et al., 1988). Obwohl diese Algorithmen existieren, ist uns nicht genau klar, wie das visuelle System des Menschen Kanten entdeckt und diese für uns verarbeitet. Ebenfalls ist nicht bekannt, wie genau das visuelle System überhaupt Kanten von Nicht-Kanten unterscheidet. Dies ist normalerweise einer der Grundbausteine für die Kantenentdeckung, sowohl beim Menschen als auch in vielen Algorithmen der Kantenentdeckung.

Um herauszufinden, wie das visuelle System des Menschen Kanten entdeckt und sie von anderen Einflüssen unterscheidet, wäre es für den Anfang wichtig zu wissen, inwiefern Helligkeits- und Kantenwahrnehmung einander bedingen. Da diese beiden Eigenschaften von Objekten essenziell sind für die Kantenentdeckung. Um für die Beantwortung dieser Frage einen Grundbaustein zu legen, werde ich in meiner Thesis überprüfen, ob das visuelle System des Menschen empfindlicher für Kanten oder für Helligkeitsunterschiede ist. Daraus entsteht die Fragestellung, welche ich im Laufe meiner Bachelorarbeit mit dem Vergleichen von zwei verschiedenen Experimenten erforschen und beantworten möchte:

Ist das visuelle System des Menschen empfindlicher für Kanten oder Luminanzunterschiede?

Mit einer eindeutigen Antwort auf diese Fragestellung, könnten wir einen Schritt näher zur Lösung der Frage kommen, wie der Mensch Kanten entdeckt und sie von nicht-Kanten unterscheidet. Die Fragestellung ist sinnvoll, da wir danach besser in der Lage sein könnten, die Vorgänge des visuellen Systems des Menschen zu verstehen. Zu dieser Forschungsfrage gehört auch eine Hypothese, welche im Laufe dieser Bachelorarbeit überprüfen und einem kritischen Test unterziehen möchte. Wie ich meine Hypothese herleite und eine kurze Zusammenfassung, wie mein Plan lautet diese zu erforschen wird im nächsten Abschnitt erläutert.

1.3 Hypothese

Es existieren bereits mehrere wissenschaftliche Publikationen zum Thema Kantenerkennung und Helligkeitswahrnehmung. Viele von diesen Studien und Arbeiten gehen in eine hinreichend ähnliche Richtung, um die Ergebnisse für meine Fragestellung zu beachten. Tolhurst und Dealy (1975) haben zum Beispiel zwei Experimente durchgeführt, um zu untersuchen, ob Menschen besser in der Lage sind, Kanten zu erkennen oder Luminanzen zu beurteilen. Von diesen beiden ist nur das Kantenexperiment relevant für mein Thema. Hier wurden zwei Intervalle gezeigt und in einem dieser Intervalle eine Kante platziert. Die Aufgabe der Proband*innen war es dann zu sagen, in welchem der beiden Intervalle die Kante platziert wurde. Außerdem musste beurteilt werden, welche Polarität die Kante besaß, also auf welcher Seite sie hell oder dunkel war. Es wurde somit überprüft, ob die Schwelle für die Erkennung einer Kante höher oder niedriger ist als die Fähigkeit, die Polarität dieser Kante korrekt zu beurteilen. Die Studie ergab, dass das visuelle System des Menschen sensitiver für Kantendetektion als für Polaritätsdetektion (Helligkeitswahrnehmung) ist (Tolhurst & Dealy, 1975).

Da mein Experiment dem gerade genannten sehr ähnlich ist, werde ich meine Hypothese den Ergebnissen entsprechend formulieren. Dies führt zur folgenden Hypothese:

Das visuelle System des Menschen hat eine höhere Sensitivität für Kanten im Vergleich zu Luminanzunterschieden.

Hinsichtlich meiner Forschungsfrage würde das bedeuten, dass die Wahrnehmung von Kanten die Wahrnehmung von Helligkeiten bedingt.

1.4 Ausblick und Zusammenfassung

Um meine Fragestellung zu beantworten, werde ich zwei verschiedene Experimente miteinander vergleichen, die sich nur in der Aufgabe der Proband*innen unterscheidet. Das heißt sowohl Versuchsaufbau als auch alle Stimuli werden, bis auf wenige Unterschiede, die gleichen sein. Im ersten Experiment wird die Aufgabe der Proband*innen sein, eine Kante zu detektieren. Im zweiten Experiment soll die Polarität der Kante bestimmt werden. Anders als bei Tolhurst und Dealy (1975) werde ich die beiden Experimente getrennt voneinander durchführen und andere Stimuli benutzen. Das Experiment zur Kantendetektion wurde bereits von Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mir für meine Forschung bereitgestellt. Das Experiment zur Polaritätswahrnehmung habe ich selbst durchgeführt. Bei beiden Experimenten handelt es sich um psychophysische Experimente. Dabei besagt der Fachbegriff Psychophysik lediglich, dass es sich um einen wissenschaftlichen Ansatz handelt, welcher mentale Prozesse wie zum Beispiel das visuelle System misst beziehungsweise sich damit befasst (Link, 2001). Also die Untersuchung von verschiedenen Reizen und unserer Wahrnehmung dieser. Welche Methode in dem Kantenexperiment benutzt wurde und wie die Ergebnisse aussehen, wird im nächsten Kapitel erklärt. In beiden Experimenten werden die gleichen Stimuli genutzt, vorgestellt in Kapitel 2. Außerdem werde ich in Kapitel 2 das Experiment zur Kantenwahrnehmung vorstellen und dabei alle Stimuli, Designentscheidungen und Ergebnisse erklären. Kapitel 3 beinhaltet Informationen zum Polaritätsexperiment. Danach vergleiche ich die Ergebnisse der beiden Experimente und beantworte meine Fragestellung. Mit diesem Wissen kann ich später ein Fazit darüber ziehen für welchen Reiz das visuelle System des Menschen empfindlicher ist.

Ich beabsichtige also zu untersuchen, ob das visuelle System des Menschen empfindlicher auf Kanten oder Helligkeitsunterschiede reagiert und ob diese beiden Eigenschaften von Objekten zusammenhängen. Um die Frage zu beantworten, führe ich einen kritischen Test meiner Hypothese durch, in der ich behaupte, dass wir in der Kantenwahrnehmung besser sind als in der Helligkeitwahrnehmung. Hierfür führe ich ein psychophysisches Experiment durch, in welchem ich die Fähigkeit der Proband*innen testen werde, die Polarität einer Kante wahrzunehmen, wenn diese von verschiedenen Dingen verändert werden. Im Anschluss vergleiche ich meine Daten mit denen aus Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung) und versuche mit den neuen Einsichten aus diesem Vergleich meine Fragestellung zu beantworten.

Kapitel 2

Methode des Kantenexperiments

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erklärt, werde ich für die Beantwortung meiner Fragestellung zwei Experimente miteinander vergleichen. In diesem Abschnitt soll es um die Studie von Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung) gehen. Insbesondere um das Kantenexperiment, welches für diese Studie durchgeführt wurde. Um zu verstehen, wie das visuelle System des Menschen sinnvolle Informationen aus dem Licht auf der Retina extrahiert, haben sie die Kantenempfindlichkeit in unterschiedlichen Experimentalbedingungen gemessen.

2.1 Studiendesign

2.1.1 Stimuli

Als Grundlage für das Experiment wurde sowohl für den Hintergrund als auch für die Stimuli ein grauer Farbton mit einer durchschnittlichen Luminanz von 100 cd/m^2 gewählt. Dabei waren die Stimuli immer 4×4 Grad Sehwinkel groß. Bei diesem Stimulus handelt es sich um eine spezielle Art von Kante, welche als Cornsweet-Kante bekannt ist. Cornsweet-Kanten zeichnen sich dadurch aus, dass es einen zentralen Luminanzsprung gibt, welcher zu einer horizontalen Kante führt und sich nach oben und unten linear der mittleren Luminanz nähert. Dies wird durch die Verwendung einer Rampe erreicht, bei der die Luminanz langsam ansteigt und fällt. Es wurden drei verschiedene horizontale Cornsweet-Kanten ausgewählt, welche sich in der Breite ihrer Rampen unterscheiden haben. Die Rampenbreiten betragen jeweils 2.88 arcmin , 9 arcmin und 58.8 arcmin . Die Auswahl der drei Cornsweet-Kanten erfolgte, um die Bandbreite der räumlichen Frequenzen zu testen, die für das visuelle System relevant sind. Wie diese Kanten aussehen, wird in Abbildung 3 gezeigt.

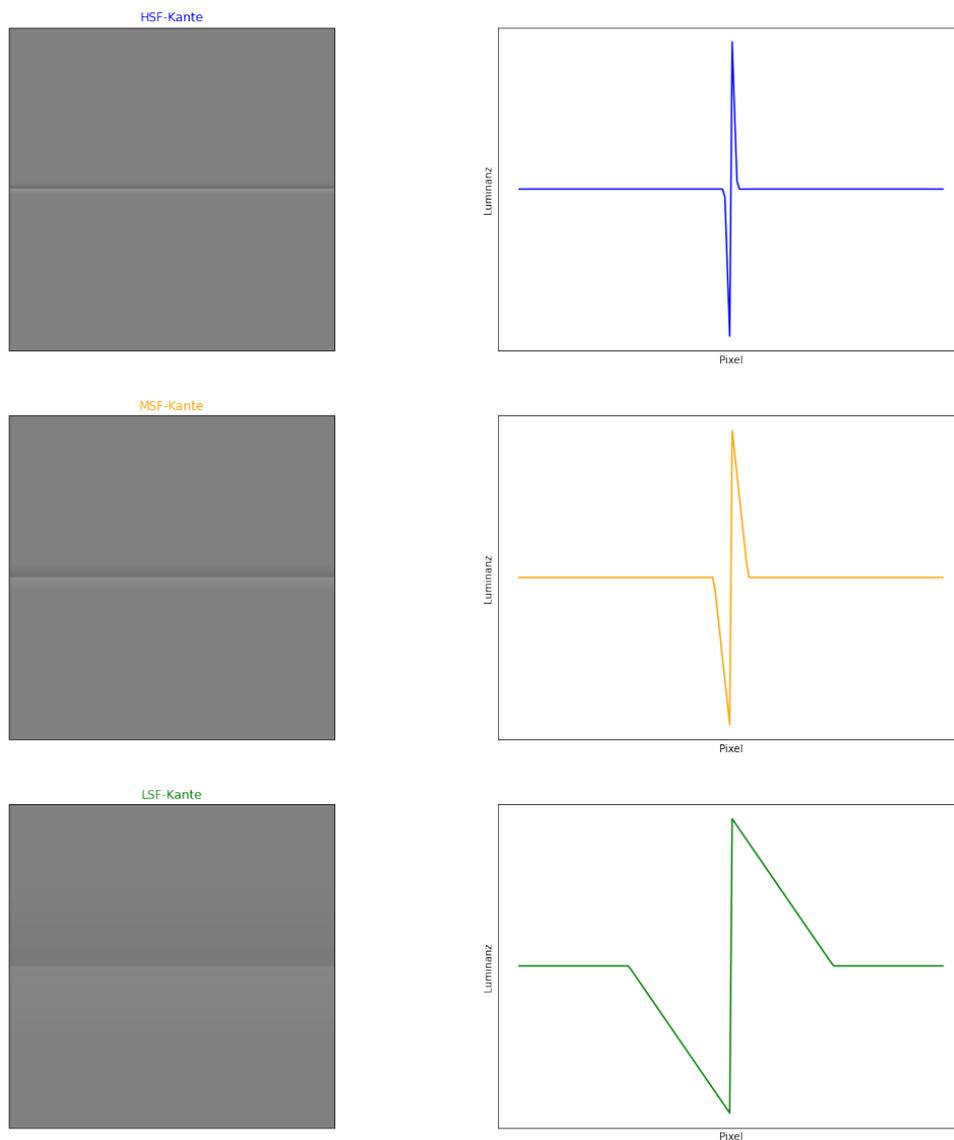


Abbildung 3: Cornsweet-Kante auf einem grauen Stimulus. Alle drei Kanten haben eine andere räumliche Frequenz von gering (low spatial frequency - LSF) über mittel (medium spatial frequency - MSF) bis hoch (high spatial frequency - HSF) und unterschiedlich breite Rampen. Rechts im Graphen sieht man jeweils das Luminanzprofil, welches einen vertikalen Schnitt durch den Stimulus und die beinhaltete Cornsweet-Kante zeigt.

Wie man an der Abbildung sehen kann, wirken sich die verschiedenen Breiten auf das Aussehen der Cornsweet-Kanten aus. Je geringer die räumliche Frequenz, desto breiter wird die Kante. Im dritten Stimulus mit geringer räumlicher Frequenz sind die Rampen so breit, dass beim Betrachten eine Cornsweet-Illusion auftreten kann. Die Cornsweet-Illusion ist ein Phänomen der visuellen Wahrnehmung, bei dem die wahrgenommene Helligkeit eines Objekts durch eine eingefügte Kante beeinflusst wird. Durch den graduellen Verlauf der Luminanz entsteht die Illusion, dass verschiedene Randbereiche eines Stimu-

lus unterschiedliche Helligkeiten haben, obwohl die Luminanz in beiden Randregionen genau die gleiche ist (Cornsweet, 1970). Wenn man beispielsweise einen schwarzen Balken über den zentralen Bereich der Cornsweet-Illusion legen würde, würden die Bereiche, die zuvor perzeptuell unterschiedliche Helligkeiten aufwiesen, wieder gleich erscheinen. Die Cornsweet-Kante wird oft in der visuellen Wahrnehmungsforschung verwendet, um die Mechanismen der Helligkeitswahrnehmung und der visuellen Verarbeitung im Gehirn zu untersuchen. Die Kante wurde entweder im oberen oder unteren Stimulusbereich zufällig platziert. Jeweils 0,5 Grad Sehwinkel von dem Mittelpunkt des Stimulus entfernt. Auf diesen Stimulus wurde anschließend jeweils eines von sieben verschiedenen Arten von Rauschen angewendet, dargestellt in der nächsten Abbildung. Die Namen der Masken stehen jeweils über einem Beispiel.

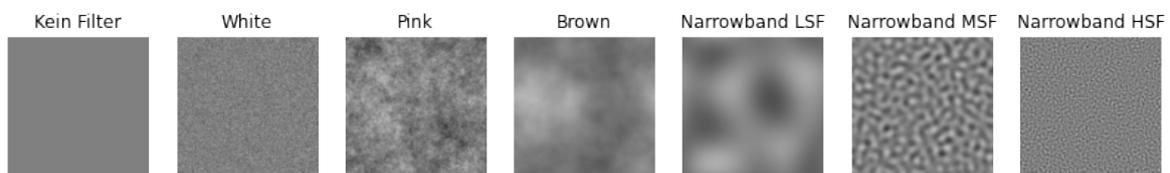


Abbildung 4: Arten von Rauschen / Masken, welche im Experiment genutzt worden sind.

Wenn eine dieser Masken auf einem Stimulus oder Bild platziert wird, werden Kanten, Kontraste und Helligkeiten schwerer zu erkennen oder zu unterscheiden sein. Das liegt daran, dass das Rauschen die feinen Details in den visuellen Reizen maskieren kann und dadurch deren Unterscheidbarkeit beeinträchtigt. Alle Masken haben bei gleichem Kanten-Kontrast das gleiche Signal-Rausch-Verhältnis (SNR: engl. Signal-Noise-Ratio). Das SNR ist ein Maß für die Stärke des gesuchten Signals im Verhältnis zum Hintergrundrauschen (unerwünschtes Signal). Also die Kante oder der Kontrast der Cornsweet-Kante im Vergleich zur ausgewählten Art des Rauschens.

Sowohl die Kantenstimuli als auch die verschiedenen Formen von Rauschen wurden gezielt ausgewählt, um eine breite Palette der zugrunde liegenden Mechanismen des visuellen Systems des Menschen betreffen zu können.

Durch die Kombination von drei Cornsweet-Kanten und sieben verschiedenen Masken ergeben sich somit insgesamt 21 unterschiedliche Stimulivarianten. In der nächsten Abbildung werden alle Stimuli einmal dargestellt. Um eine bessere Übersicht zu ermöglichen wurden die Cornsweet-Kanten in der Mitte der Stimuli positioniert. Im Experiment selbst wurden sie, wie bereits erwähnt, zufällig im oberen oder unteren Stimulusbereich platziert.

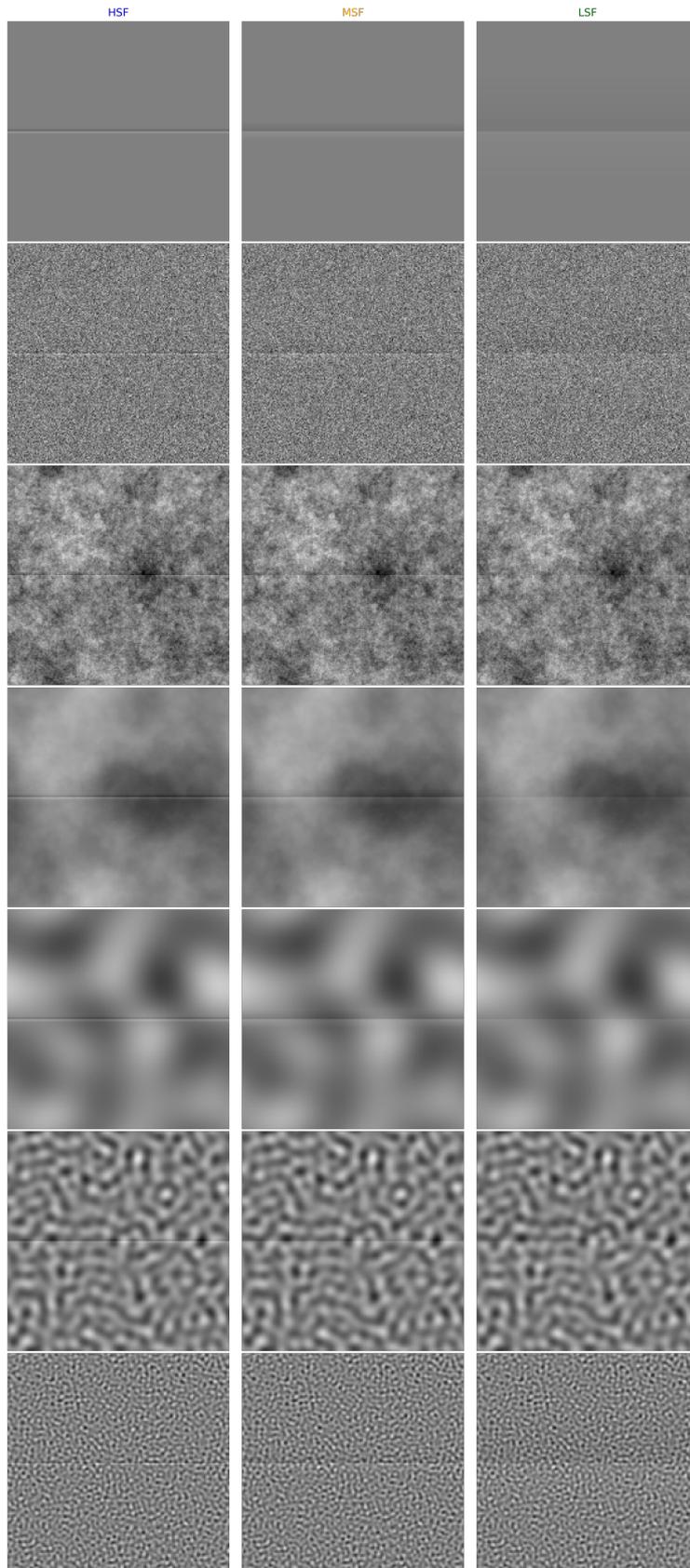


Abbildung 5: Alle im Experiment genutzten Stimuli. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: (1) HSF, (2) MSF, (3) LSF. Reihen sind die verschiedenen Masken von oben nach unten: (1) keine Maske, (2) White, (3) Pink, (4) Brown, (5) Narrowband LSF, (6) Narrowband MSF, (7) Narrowband HSF.

Vor dem Experiment wurden jeweils 40 verschiedene Varianten für jede Maske erstellt. Während des Experiments wurden diese Varianten zufällig ausgewählt und den Proband*innen präsentiert. Ein positiver Effekt dieser Vorgehensweise ist, dass wir bei den Ergebnissen jederzeit genau nachverfolgen können, welche Version der Maske verwendet wurde. Wenn die Masken bei jedem Block zufällig generiert worden wären, wäre es schwieriger gewesen, dies nachzuvollziehen. Des Weiteren wurden für jede der drei Cornsweet-Kanten fünf verschiedene Kontraste verwendet, die speziell für jede der sieben Masken erstellt wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass sowohl ein Kontrast gewählt wurde, bei dem es unmöglich war, die Kante wahrzunehmen (50% Korrektheit, da geraten werden muss), als auch ein Kontrast, bei dem es sehr einfach sein sollte, die richtige Entscheidung zu treffen (100% Korrektheit).

2.1.2 Versuchsaufbau

Zur Gewährleistung optimaler Testbedingungen wurden die Proband*innen in einem abgedunkelten Teil des Labors platziert, um äußere Lichteinflüsse und andere Ablenkungen zu minimieren und die Ergebnisse zu festigen. Gezeigt wurden die Stimuli auf einem Siemens SMM 21106 LS Monitor (40x30 cm, 1024x768 px, 130 Hz). Die Proband*innen saßen einen Meter entfernt vom Bildschirm und wurden gebeten ihren Kopf auf einer Kinnstütze abzulegen. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Proband*innen immer den gleichen Seh- beziehungsweise Blickwinkel auf die Stimuli hatten und die Entfernung zum Stimulus konstant eingehalten wurde. Den Testteilnehmern wurde für die Eingabe der Entscheidungen ein Eingabegerät mit 5 Knöpfen gegeben. Bei dem Eingabegerät handelte es sich um ein "RESPONSEPixx Handheld", bereitgestellt vom Fachgebiet. Um ihre Antwort einzutragen, mussten die Teilnehmenden entweder den oberen oder den unteren Knopf auf dem Gerät drücken, um anzugeben, ob die Cornsweet-Kante im oberen oder unteren Bereich des Stimulus lag.

Die Aufgabe der Proband*innen bestand darin zu entscheiden, ob sich die Kante über- oder unterhalb des Mittelpunkts der einzelnen Stimuli befand. Bei dem Experiment handelt es sich um eine Two-alternative forced Choice Methode (2-AFC), da die Testperson bei jeder Entscheidung, die sie treffen muss, immer nur zwei verschiedene Auswahlmöglichkeiten hat (oben / unten) und gezwungen wird eine davon zu wählen, da es keine andere Auswahlmöglichkeit gibt.

2.2 Versuchsablauf

Um die benötigte Mindestmenge an Daten zu erreichen und die Dauer des Experiments zu begrenzen, wurde das Experiment in zwei Durchgänge aufgeteilt. Dies hatte zusätzlich den Vorteil, dass Ermüdung entgegengewirkt werden konnte. Wie im Versuchsaufbau erklärt, haben sich die Testpersonen einen Meter entfernt vom Bildschirm an den Tisch gesetzt. Auf diesem lag das Eingabegerät, welches für die Entscheidung genutzt wurde. Vor dem Experiment wurde den Proband*innen die Aufgabe erklärt und ein paar Beispiele mit richtigen Lösungen auf einem Infoblatt gezeigt. Die Aufgabe war ebenfalls in Englisch auf diesem beschrieben. Nach der Erklärung wurden die Testpersonen dann gebeten sich in den abgedunkelten Bereich des Raums zu begeben, damit das Experiment starten konnte.

Vor dem richtigen Experiment wurde ein Warm-up durchgeführt. Dies hatte genau die gleichen Stimuli wie das Experiment, jedoch auf eine Anzahl von 50 bis 100 begrenzt. Die Stimuli hierfür wurden zufällig aus allen Kombinationen ausgewählt. Außerdem gab es zu jeder Entscheidung der Testperson Feedback, sodass sichergestellt werden konnte, dass die Aufgabe korrekt verstanden wurde. Nach dem Warm-up und der Prüfung, dass die Aufgabe verstanden wurde, wurde das richtige Experiment gestartet. Hier bekam die Testperson kein Feedback mehr. Ein Beispiel, wie ein Stimulus auf dem Bildschirm aussah, kann man in Abbildung 7 sehen. Es handelt sich hierbei jedoch nur um ein Symbolbild, da vor allem die Grautöne von Stimulus und Hintergrund auf dem genutzten Monitor etwas anders aussahen als auf dieser Abbildung.

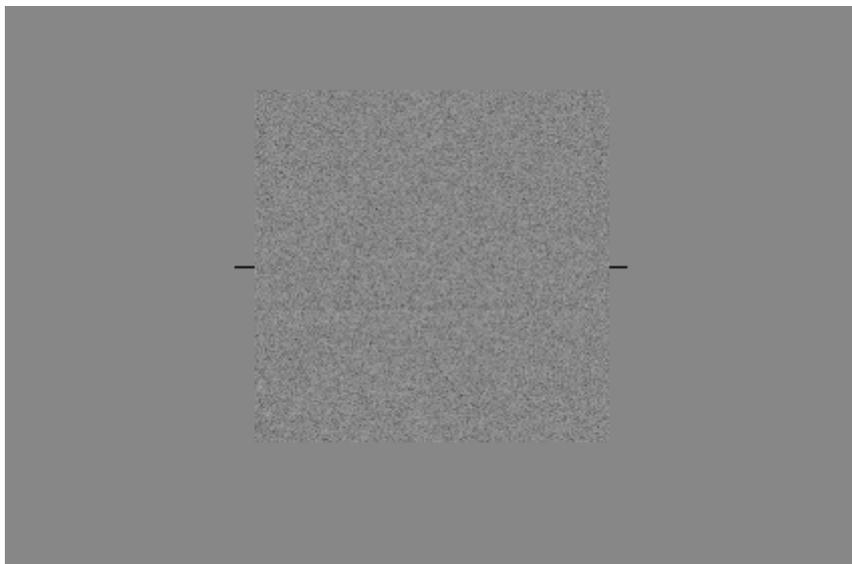


Abbildung 6: Beispielstimulus (White, Cornsweet-Kante mit HSF) aus dem Experiment. Illusion ist unterhalb des Mittelpunkts platziert. Richtige Lösung ist hier "unten", da die Cornsweet-Kante unter dem Mittelpunkt, also im unteren Stimulusbereich liegt.

Wie man an der Abbildung sehen kann, gibt es neben dem Stimulus noch zwei schwarze Striche links und rechts. Diese dienen dazu den Testpersonen zu vermitteln, wo die Mitte des Stimulus liegt. Dies hat besonders bei den Stimuli ohne Maske geholfen, da es sonst schwer gewesen wäre zu sehen, wo der Stimulus platziert war. Die Cornsweet-Kante wurde entweder 0, 5 Grad Sehwinkel über oder unter dem Mittelpunkt platziert. Da es Zufall war, wo die Kante platziert wird, gab es kein Muster oder ähnliches, welches die Entscheidung beeinflussen hätte können. Außerdem wurde die Kante zufällig um 180 Grad gedreht, sodass es Zufall war in welche Richtung die hellere Seite gezeigt hat.

Vor und zwischen den Stimuli wurde immer ein Fixationspunkt gezeigt, welcher genau in der Mitte des Bildschirms platziert wurde. Genau dort, wo der Stimulus erscheint. Kurz bevor dieser gezeigt wurde, ist der Fixationspunkt verschwunden. Die Testpersonen wurden gebeten innerhalb eines Blocks immer diesen Punkt zu fixieren, um zu vermeiden,

dass der Blick abschweift. Die Stimuli wurden über 100ms mit steigendem Kontrast einblendet, gefolgt von 200ms bei vollem Kontrast, und wurden dann über 100ms wieder ausgeblendet. Dabei haben sie immer beim Einblenden einen Signalton von sich gegeben, um die Aufmerksamkeit zu steigern. Um den Einfluss von Erinnerungen bei den Proband*innen zu minimieren, wurde darauf geachtet, dass die gleiche Maske innerhalb von fünf aufeinanderfolgenden Iterationen von Stimuli nur einmal präsentiert wurde. Zu Anfang eines jeden Blocks wurden immer drei einfache Durchgänge genutzt, um Verwirrung über die Aufgabe vorzubeugen. Dadurch sollte es der Testperson leichter fallen ein Gefühl für die neue Stimulivariante zu bekommen. Diese drei Durchgänge gingen jedoch nicht in die Wertung mit ein.

In einem Experimental-Block wurde immer die gleichen Stimulusvariante gezeigt (Cornsweet-Kante plus Rauschmaske). Zwischen den einzelnen Experimental-Blöcken war es den Teilnehmern möglich eine Pause einzulegen. Um weiterzumachen musste auf dem Eingabegerät lediglich ein Knopf gedrückt werden. In den meisten Fällen haben sich die Testpersonen dazu entschieden eine relativ kurze Pause zu machen. Wie vorher erwähnt gab es für jede Cornsweet-Kante fünf verschiedene Kontraste, welche in einem Block jeweils 20-mal wiederholt wurden. Von den 40 Varianten der Masken wurden jeweils 20 zufällig ausgewählt. Durch die Kombinationen der einzelnen Komponenten kommen wir somit auf 100 Durchgänge pro Block. Insgesamt ergeben sich pro Fertigstellung des Experiments 2100 Ergebnisse. Dank der doppelten Durchführung des Experiments kommen wir auf 4200 Datenpunkte pro Testperson.

2.3 Ergebnisse

Insgesamt haben sechs Proband*innen am Experiment teilgenommen. Dank der Ergebnisse war es Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung) möglich psychometrische Funktionen zur Kantendetektion zu messen. Die psychometrische Funktion beschreibt den Zusammenhang zwischen der Leistung eines Beobachters und einer unabhängigen Variable (Wichmann & Hill, 2001). Diese Kurven zeigen also den Zusammenhang zwischen der Stärke des Reizes, in diesem Fall dem Kontrast der Cornsweet-Kante und der Fähigkeit die hellere Seite des Stimulus korrekt auszuwählen. Die psychometrischen Funktionen des Kantendetektionsexperiments können im Appendix 1 gefunden werden. In Abbildung 5 sind die erzielten Kontrastschwellen des Kantenexperiments, in denen die Proband*innen zu 75% richtig lagen, dargestellt. Diese wurden mit Hilfe der psychometrischen Funktionen erstellt.

In den drei Graphen kann man erkennen, wie die Testpersonen das Kantenexperiment abgeschlossen haben. Dabei zeigen die Graphen die unterschiedlichen Cornsweet-Kanten. Es gibt drei verschiedene Experimentalkonditionen, in denen die Kantensensitivität der Proband*innen sehr ähnlich zueinander sind, nämlich keine Maske, Brown und Narrowband LSF. Diese drei Masken scheinen nicht sehr effektiv mit der Kantensensitivität zu interferieren. Im Gegensatz dazu haben die Rauschmasken Pink und Narrowband MSF einen besonders starken Einfluss darauf. In allen drei Graphen können wir sehen, dass die Schwellenwerte dieser beiden Maske sehr hoch sind, vor allem bei den Cornsweet-Kanten mit mittlerer und geringer räumlichen Frequenzen (mittlerer und rechter Graph).

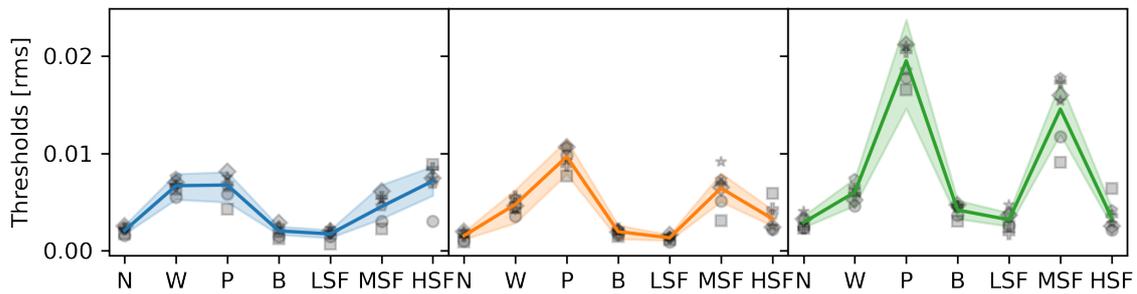


Abbildung 7: Kontrastwerte, bei denen die Proband*innen eine Treffgenauigkeit von 75% erreicht haben. Die Symbole spiegeln die einzelnen Testpersonen wider. Die Bereiche um die einzelnen Linien zeigen ein 95%-Konfidenzintervall der kombinierten Daten. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: hohe, mittlere, geringe räumliche Frequenz. Abkürzungen der einzelnen Masken: (N) keine Maske, (W) White, (P) Pink, (B) Brown, (LSF) Narrowband LSF, (MSF) Narrowband MSF, (HSF) Narrowband HSF.

Sowohl die Maske White als auch Narrowband HSF scheinen bei der Cornsweet-Kante mit hoher räumlicher Frequenz effektiv zu sein, bei den anderen beiden Kantenarten eher weniger. Insgesamt kann man beobachten, dass die Kantensensitivität der Proband*innen für die Cornsweet-Kante mit geringer räumlicher Frequenz in allen Rauschmasken niedriger ist als für die anderen beiden Kanten. Dabei wird die Maske ohne bestimmtes Rauschen ignoriert. Die Konfidenzintervalle sind in allen drei Graphen relativ gering und zeigen keine sehr großen Abweichungen zu den Hauptwerten.

2.4 Bedeutung für die Fragestellung

Da ich überprüfen möchte, für welchen Reiz Menschen empfindlicher sind, entweder Kanten oder Helligkeiten, kann ich ohne vergleichbare Werte aus dem Polaritätsexperiment noch keinen Bezug auf meine Fragestellung nehmen. Erst mit dem Vergleich mit den Daten aus dem Polaritätsexperiment kann ich die Daten effektiv benutzen. Im nächsten Abschnitt dieser Thesis wird das Polaritätsexperiment und die Ergebnisse von diesem vorgestellt. Im Anschluss vergleiche ich die Ergebnisse der beiden Experimente, um meine Fragestellung beantworten zu können.

Kapitel 3

Methode des Polaritätsexperiments

In diesem Abschnitt der Thesis wird auf das durchgeführte Polaritätsexperiment eingegangen. Da sowohl die Stimuli als auch die Methoden sehr ähnlich zum vorangegangenen Experiment sind, werden diese Themengebiete nur kurz behandelt. Für vollständige Definitionen und Erklärungen kann das vorherige Kapitel genutzt werden. Der Hauptunterschied ist die Aufgabe der Proband*innen. Während zuvor entschieden werden musste, in welchem Bereich des Stimulus eine Kante vorhanden ist, geht es nun darum, in welche Richtung die hellere Seite der Cornsweet-Kante zeigt. Somit wird die Fähigkeit der Proband*innen getestet, verschiedene Polaritäten wahrzunehmen. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse präsentiert und interpretiert, um ein umfassendes Bild des Experiments zu vermitteln.

3.1 Studiendesign

3.1.1 Stimuli

Die Stimuli in diesem Experiment sind identisch mit denen des Kantenexperiments. Sowohl die Cornsweet-Kanten mit ihren jeweiligen Breiten als auch die verschiedenen Arten von Rauschen sind gleich. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Experimenten besteht in den Kontrasten der Cornsweet-Kanten. Diese mussten an das Polaritätsexperiment angepasst werden, da die vorherigen Werte sich als ungeeignet erwiesen haben. Als wir die gleichen Kontraste genutzt haben, war die Aufgabe, die Polarität der Kante zu detektieren, zu schwierig für die Proband*innen. Für einen besseren Vergleich wurden daher angepasste Kontrastwerte verwendet. Es wurde wieder darauf geachtet, dass es einen Kontrast gibt, bei der es nicht möglich ist die Cornsweet-Kante wahrzunehmen (ca. 50% Korrektheit) und eine bei der es sehr leicht sein sollte die richtige Entscheidung zu treffen (ca. 100% Korrektheit). Um gute Werte zu finden, wurde für jede der 21 Kombinationen eine 3-zu-1 Staircase durchgeführt. Bei dieser Methode hängt der derzeitige Stimulus immer von den Ergebnissen der vorherigen Antworten ab. Wenn dreimal hintereinander korrekt entschieden wurde, wird sie eine Stufe nach oben gesetzt und der genutzte Kontrast wird etwas geringer, somit wird die Schwierigkeit erhöht. Sollte eine falsche Entscheidung getroffen werden, passiert das Gegenteil und der Stimulus wird etwas leichter. Mit den Ergebnissen aus dieser Staircase konnte ich psychometrische Funktionen erstellen, durch welche ich geeignete Werte für das Polaritätsexperiment ermitteln konnte. Die drei restlichen Kontraste wurden zwischen diesen zwei Extrema beziehungsweise Grenzen gewählt und für das Experiment genutzt.

3.1.2 Versuchsaufbau und Ablauf

Alle Stimuli wurden mit Python3 erstellt. Dazu wurde leicht modifizierter Python-Code von Lynn Schmittwilken vom Fachgebiet Computational Psychology genutzt. Der gleiche, noch unmodifizierte, Code wurde zuvor genutzt, um das Kantenexperiment durchzuführen. Damit die Auswertung korrekt stattfindet, wurde die Kontrolle der Antworten der Proband*innen an die Aufgabenstellung angepasst. Das Experiment wurde im gleichen Labor durchgeführt und hat dementsprechend die gleichen Versuchsbedingungen und Gegenstände wie Bildschirm, Kontrollgerät etc. Der zentrale Unterschied zwischen den Experimenten ist die Aufgabe, hier mussten die Proband*innen nicht mehr entscheiden, wo die Kante platziert wurde, sondern in welche Richtung die hellere Seite der Cornsweet-Kante gezeigt hat. Entweder nach Norden oder nach Süden vom Mittelpunkt des Stimulus. Trotz geänderter Aufgabe handelt es sich immer noch um ein Two-Alternative forced choice Experiment (2AFC), da nur zwei Auswahlmöglichkeiten zur Wahl standen.

3.2 Ergebnisse

Leider konnte ich nicht alle Proband*innen aus Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung) testen, daher wurde eine Testperson nicht in der finalen Auswertung beachtet. Insgesamt haben fünf Testpersonen am Experiment teilgenommen, davon drei Männlich und zwei Weiblich. Jede Testperson hat das Experiment zweimal durchgeführt. Von diesen fünf Proband*innen waren zwei informiert über das Experiment und die anderen drei zum Teil informiert, da sie bereits Wissen über das Thema besaßen. Normalsichtigkeit war bei allen Proband*innen, entweder korrigiert oder ohne weitere Hilfe, vorhanden. Außerdem haben alle Testperson, welche an diesem Experiment teilgenommen haben, auch an dem Kantenexperiment aus Schmittwilken & Maertens (in Bearbeitung) teilgenommen. Das sollte dafür sorgen, dass die Ergebnisse aussagekräftiger sind, da wir einen direkten Vergleich haben, wie die Proband*innen abgeschlossen haben in den beiden Experimenten. Mit den Datensätzen der Proband*innen war es wieder möglich, die psychometrischen Funktionen zu berechnen. Die Graphen können in Appendix 2 betrachtet werden. Wie bei dem Kantenexperiment wurden die Schwellenwerte berechnet, bei denen die Testpersonen in 75% der Fälle eine korrekte Antwort gegeben haben, und in Abbildung 8 dargestellt.

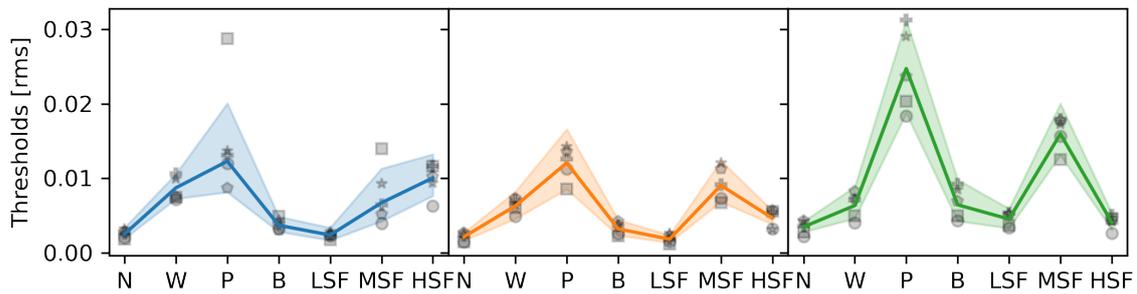


Abbildung 8: Kontrastwerte, bei denen die Proband*innen eine Treffgenauigkeit von 75% erreicht haben die hellere Seite korrekt zu erkennen. Die Symbole spiegeln die einzelnen Testpersonen wider. Die Bereiche um die einzelnen Linien zeigen ein 95%-Konfidenzintervall der kombinierten Daten. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: hohe, mittlere, geringe räumliche Frequenz. Abkürzungen der einzelnen Masken: (N) keine Maske, (W) White, (P) Pink, (B) Brown, (LSF) Narrowband LSF, (MSF) Narrowband MSF, (HSF) Narrowband HSF.

In allen drei Graphen ist klar erkennbar, dass die Rauschmasken Brown und Narrowband LSF den Werten ohne spezifische Rauschmaske stark ähneln. Ähnlich wie beim Kantenexperiment scheinen diese beiden Masken keine signifikante Verringerung der Kontrastsensitivität im visuellen System zu bewirken. Die Maske White zeigt bei der Cornsweet-Kante mit hoher und mittlerer räumlicher Frequenz höhere Schwellenwerte. Bei der Kante mit geringer räumlicher Frequenz zeigt sie keine Besonderheiten und ähnelt unter anderem Brown. Narrowband HSF scheint ebenfalls wenig Einfluss zu haben, da die Schwellenwerte dem der Maske White ähneln. Im linken Graphen zeigt sich eine leicht erhöhte Schwelle im Vergleich zu den anderen beiden Graphen. Im Gegensatz dazu scheint die letzte Art von Narrowband-Rauschen, Narrowband MSF, genau dort effektiv zu sein, wo Narrowband HSF es nicht ist. In den mittleren und rechten Graphen sind die Schwellenwerte im Vergleich zu den anderen Daten relativ hoch. Dennoch erreichen sie nicht die Höhe der Werte der Rauschmaske Pink, die in allen drei Graphen mit Abstand die höchsten sind. Insbesondere bei der Cornsweet-Kante mit geringer räumlicher Frequenz liegt die Schwelle für die Maske Pink extrem hoch und erreicht fast 0.025.

Nun, da alle erforderlichen Daten für beide Experimente vorliegen, können wir mit einem Vergleich der experimentellen Daten beginnen. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse beider Experimente analysiert und miteinander verglichen, um die Hypothese zu untersuchen und mit den neuen Erkenntnissen meine Fragestellung zu beantworten.

Kapitel 4

Vergleich der Experimente

In meiner Thesis möchte ich herausfinden, ob das visuelle System des Menschen empfindlicher für Kanten oder für Helligkeiten ist. Um eine Antwort auf diese Fragestellung zu bekommen, vergleiche ich im kommenden Kapitel die Daten aus dem Kanten- und Polaritätsexperiment. Dafür werden sowohl die psychometrischen Funktionen als auch die Schwellenwerte betrachtet und verglichen.

4.1 psychometrische Funktionen

Um einen guten Überblick über die beiden Datensätze zu bekommen, wurden als Erstes die psychometrischen Kurven bzw. Funktionen der beiden Experimente übereinander gelegt. In Abbildung 10 kann man die beiden Datensätze sehen. Dabei spiegeln die blauen Linien das Kantenexperiment wider und die orangen Linien das Polaritätsexperiment. Außerdem wurden die Konfidenzintervalle (68%) der beiden Datensätze hinzugefügt.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die psychometrischen Kurven des Polaritätsexperiments in allen Stimuliarten weiter rechts liegen als die Kurven des Kantenexperiments. Dieses Muster impliziert, dass die Sensitivität für Kanten in allen Stimulikonditionen höher ist als die Sensitivität für Polaritäten beziehungsweise Helligkeiten. Besonders bei den Masken Pink und Narrowband MSF werden deutliche Unterschiede zwischen den Kurven der Experimente sichtbar. Diese Unterschiede sind sehr groß und heben sich von den anderen Stimulikonditionen ab, bei denen zwar auch Unterschiede existieren, jedoch nicht in dem Ausmaß wie bei den genannten Masken. Diese beiden Masken sind auch die einzigen welche ein breiteres Konfidenzintervall besitzen. Vor allem bei der Maske Pink fällt das größere Konfidenzintervall auf.

Wenn wir die maximal erreichten Prozentsätze betrachten, kann man erkennen, dass trotz der bewusst gewählten Kontrastwerte in den meisten Fällen keine 100%ige Korrektheit erzielt wurde. Dies könnte auf die Lapse-Rate zurückzuführen sein, die sich auf die Häufigkeit von falschen Antworten bezieht, die durch Faktoren verursacht werden, die nichts mit den getesteten Stimuli zu tun haben. Dies kann aufgrund von verschiedenen Dingen passieren wie zum Beispiel kurzzeitige Unaufmerksamkeit oder Tippfehler bei der Eingabe von Antworten. In fast allen Experimentalkonditionen konnten die Testpersonen eine höhere Korrektheit im Kantenexperiment erreichen. Es ist jedoch schwer zu sagen, ob die einzige Ausnahme (Narrowband HSF) allein auf die Lapse-Rate zurückzuführen ist oder ob es einen anderen Grund für diese Beobachtung gibt.

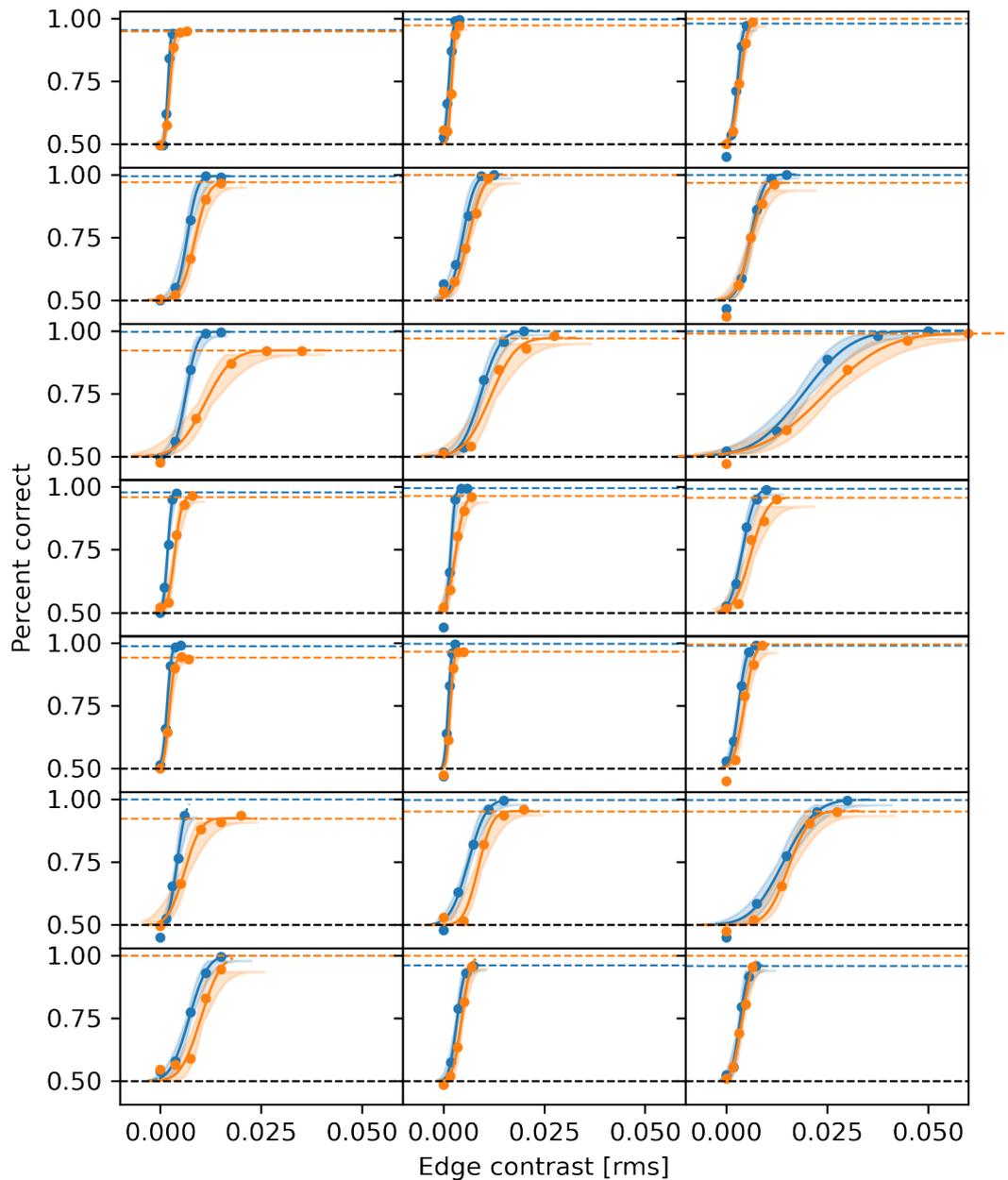


Abbildung 9: psychometrische Funktionen der Proband*innen beider Experimente. x-Achse zeigt den genutzten Kontrast, y-Achse die Korrektheit. Blaue Linien sind die Daten des Kantenexperiments, die orangen Linien spiegeln jeweils das Polaritätsexperiment wider. Eingefärbte Bereiche sind ein 68% Konfidenzintervall. Die gestrichelten Linien markieren den höchsten und niedrigsten, durchschnittlich erreichten Wert. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: (1) HSF, (2) MSF, (3) LSF. Reihen sind die verschiedenen Masken von oben nach unten: (1) keine Maske, (2) White, (3) Pink, (4) Brown, (5) Narrowband LSF, (6) Narrowband MSF, (7) Narrowband HSF.

4.2 Schwellenwerte

Aus den psychometrischen Funktionen wurden wieder die 75% Grenzen ausgerechnet und auf eine Abbildung (10) geplottet. Die Graphen vereinfachen durch die Visualisierung der Daten die Analyse.

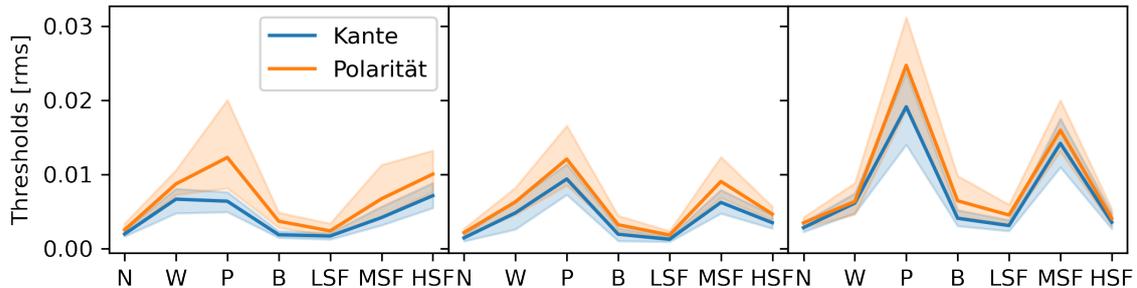


Abbildung 10: Kontrastwerte, bei denen die Proband*innen eine Treffgenauigkeit von 75% erreicht haben. Die blaue Linie zeigt die Werte des Kantenexperiments, während die orange Linie die Daten des Polaritätsexperiments zeigt. Die Bereiche um die einzelnen Linien zeigen ein 95%-Konfidenzintervall der kombinierten Daten. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: hohe, mittlere, geringe räumliche Frequenz. Abkürzungen der einzelnen Masken: (N) keine Maske, (W) White, (P) Pink, (B) Brown, (LSF) Narrowband LSF, (MSF) Narrowband MSF, (HSF) Narrowband HSF.

In den Graphen sehen wir die Kontrastwerte, bei denen die Leute eine Korrektheit von 75% erreicht haben für alle Kombinationen von Cornsweet-Kante und Rauschen. In den Graphen ist erkennbar, dass die Rauschmasken Pink und Narrowband MSF am stärksten mit sowohl der Kanten- als auch der Polaritätssensitivität interferieren. Die Masken Brown und Narrowband LSF ähneln den Werten des Stimulus ohne bestimmte Rauschmaske. Diese beiden Masken scheinen die Sensitivität für die geprüften Reize nur sehr wenig zu stören. White ebenso wie Narrowband HSF zeigen bei der Cornsweet-Kante mit geringer räumlichen Frequenz eine etwas höhere Grenze als Pink und Narrowband MSF. In den anderen beiden Kantenarten sind die Schwellenwerte dieser beiden Masken jedoch wieder geringer und interferieren weniger als Pink und Narrowband MSF. Außerdem kann man sehen, dass die Werte für die Cornsweet-Kante mit geringer räumlicher Frequenz höher sind als bei den anderen zwei Kantenarten. Dies deutet darauf hin, dass die Masken eine stärkere Interferenz in das visuelle System aufweisen, wenn es um die Wahrnehmung dieser speziellen Cornsweet-Kante geht.

Ein Blick auf die drei Graphen zeigt, dass die Schwellenwerte des Polaritätsexperiments in allen Fällen über den Schwellenwerten des Kantenexperiments liegen, auch wenn es ein paar wenige Stimuli gibt, bei denen die Werte sehr ähnlich sind. Dies würde, ähnlich wie in Abbildung 10 bei den psychometrischen Funktionen, darauf deuten, dass die Sensitivität für Kanten höher ist als für Helligkeiten. Die Konfidenzintervalle des Polaritätsexperiments sind relativ breit. In mehreren Fällen überlappen die Linien des Kantenexperiments mit den Konfidenzintervallen des Polaritätsexperiments, während das umgekehrt seltener der Fall ist. Dies könnte darauf hindeuten, dass es zwischen diesen Werten keinen signifikanten Unterschied gibt, da die Linie des Polaritätsexperiments auch auf der blauen Linie liegen könnte, falls diese innerhalb des Konfidenzintervalls liegt. Falls das der Fall wäre, würden die Ergebnisse keinen Unterschied zwischen der Sensitivität der beiden Reize zeigen können.

Um zu überprüfen, ob tatsächlich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Experimenten liegt, wird im nächsten Abschnitt eine ANOVA durchgeführt.

4.2.1 statistische Überprüfung

Um zu untersuchen, ob sich die Kontrastwerte zwischen den beiden Aufgaben statistisch signifikant voneinander unterscheiden, haben wir eine ANOVA mit Messwiederholungen durchgeführt. Diese hat die sowohl die Aufgaben und die Cornsweet-Kanten verglichen als auch die Interaktion zwischen diesen beiden. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse von dieser Überprüfung dargestellt.

| | F-Wert | Num FG | FG | Pr>F |
|--------------------------------|---------------|---------------|-----------|----------------|
| Aufgabe | 58.7257 | 1 | 4 | 0.0016 |
| Cornsweet-Kante | 25.0064 | 2 | 8 | 0.0004 |
| Aufgabe:Cornsweet-Kante | 1.2554 | 2 | 8 | 0.3356 |

Tabelle 1: Ergebnisse der ANOVA mit Messwiederholungen. FG steht für Freiheitsgrad.

In der Tabelle ist erkennbar, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Aufgaben gibt, $F(1, 4) = 58.73$, $p = 0.0016$, also die Kontrastwerte der Proband*innen unterscheiden sich zwischen den Experimenten. Dabei sind die Kontrastwerte der Proband*innen aus dem Kantendetektionsexperiment signifikant niedriger als die Kontrastwerte aus dem Polaritätsexperiment. Das bedeutet, dass die Testpersonen weniger Probleme damit hatten, die Kanten wahrzunehmen, als die Polarität dieser Kanten zu beurteilen. Somit waren die Testpersonen sensitiver für Kanten als für Luminanzunterschiede.

Außerdem konnte herausgefunden werden, dass es einen Unterschied bei den drei Cornsweet-Kanten gibt, $F(2, 8) = 25.01$, $p = 0.0004$. Dies deutet darauf hin, dass die Cornsweet-Kanten unterschiedlich effektiv darin waren, die Sensitivität für die beiden Reize zu mindern. Um zu prüfen, wie diese Unterschiede aussehen, wurde ein Tukey Post-Hoc-Test durchgeführt. Die Ergebnisse von diesem können in Tabelle 2 betrachtet werden.

| Kante 1 | Kante 2 | Differenz | P-Wert | untere Grenze | obere Grenze |
|---------|---------|-----------|--------|---------------|--------------|
| HSF | MSF | -0.0008 | 0.6213 | -0.0029 | 0.0013 |
| HSF | LSF | 0.0028 | 0.0048 | 0.0007 | 0.0049 |
| MSF | LSF | 0.0036 | 0.0002 | 0.0015 | 0.0057 |

Tabelle 2: Tukey Post-Hoc-Test für die Unterschiede in den drei Cornsweet-Kanten. LSF steht für die Cornsweet-Kante mit geringer, MSF für mittlere und HSF für hohe räumliche Frequenz.

Dieser Post-Hoc-Test zeigt uns, welche der Cornsweet-Kanten sich signifikant voneinander unterscheiden. Die Kante HSF und MSF scheinen keinen bedeutenden Unterschied aufzuweisen. Sowohl die Kante MSF als auch HSF unterscheiden sich jedoch signifikant von der Cornsweet-Kante LSF. Dabei können wir erkennen, dass die durchschnittlichen Mittelwerte von LSF höher sind als die anderen beiden. Diese Cornsweet-Kante ist also effektiver darin, die Sensitivität des visuellen Systems für sowohl Kanten als auch Helligkeiten zu schwächen.

Im Gegensatz dazu konnte keine besondere oder signifikante Interaktion zwischen der Aufgabe und den Cornsweet-Kanten gefunden werden, $F(2, 8) = 1.26$, $p = 0.3356$. Wir konnten also keine Hinweise darauf finden, dass es Sensitivitätsunterschiede zwischen den verschiedenen Kantenarten in den beiden Aufgaben gibt. Es gab lediglich eine niedrigere Gesamtsensitivität beim Polaritätsexperiment im Vergleich zum Kantenexperiment, die jedoch gleichermaßen für alle Kantenarten galt.

Kapitel 5

Diskussion

In meiner Thesis habe ich die Sensitivität des visuellen Systems des Menschen für zwei verschiedene Reize untersucht. Bei diesen Reizen handelt es sich um Kanten und Helligkeiten. Dabei war mein Ziel herauszufinden, für welchen der beiden Reize die Menschen sensitiver sind. Die Beantwortung dieser Frage kann dabei helfen herauszufinden, ob einer der beiden Reize den anderen bedingt, das heißt wir benötigen einen der beiden Reize, um den anderen wahrnehmen zu können. Um dies zu untersuchen, wurde ein Experiment zur Polaritätsentdeckung durchgeführt und einige Proband*innen getestet. Die Ergebnisse von diesem Experiment konnten dann mit den Daten aus dem Kantenexperiment von Schmittwilkins & Maertens (in Bearbeitung) verglichen werden, um die Fragestellung der Thesis zu beantworten. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Proband*innen in beiden Experimenten die gleichen waren. Die durchgeführte ANOVA zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Kontrastwerten beider Experimente gibt. Sowohl in den psychometrischen Funktionen (Abbildung 9) als auch in den Schwellenwerten (Abbildung 10) sind die Kontrastwerte des Kantenexperiments in allen Stimulikonditionen geringer als die Werte des Polaritätsexperiments. Daher lässt sich vermuten, dass das visuelle System des Menschen empfindlicher auf Kanten als auf Helligkeiten reagiert. Speziell bezogen auf die beiden Experimente bedeutet dies, dass es den Proband*innen leichter fiel, die Kanten zu detektieren als die Helligkeiten dieser Kanten zu beurteilen. Basierend auf den Annahmen, welche in der Einleitung besprochen wurden (Kanten bedingen Helligkeiten etc.) können wir daraus schließen, dass die Kantendetektion eine Voraussetzung für die Wahrnehmung von Helligkeiten ist, also sie bedingt. Dies wiederum könnte bedeuten, dass das visuelle System des Menschen dazu in der Lage sein muss, Kanten vor Helligkeiten wahrzunehmen.

Der Befund, dass Menschen besser darin sind, Kanten zu entdecken, wird durch die Ergebnisse der Studie von Tolhurst und Dealy (1975) gestützt. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, führten sie zwei ähnliche Experimente zur Kanten- und Helligkeitswahrnehmung durch und kamen zu dem Schluss, dass das visuelle System des Menschen eine bessere Fähigkeit zur Wahrnehmung von Kanten im Vergleich zur Beurteilung von Helligkeiten besitzt. Somit stimmen ihre Ergebnisse eng mit unseren eigenen überein. In ihrer Studie sind sie darauf gekommen, dass der Unterschied zwischen Kanten- und Helligkeitssensitivität nur sehr gering ist, wobei die Kantensensitivität minimal besser ist. In dieser Thesis zeigt sich ein deutlicheres Bild in unseren Ergebnissen. Hier haben wir einen größeren Unterschied zwischen der Fähigkeit der Proband*innen, die beiden Reize wahrzunehmen, denn sie sind signifikant sensitiver für Kanten.

Peromaa und Laurinen (2004) führten ebenfalls eine Studie zur Wahrnehmung von Kanten und Helligkeiten durch. Sie verwendeten einen Stimulus mit einer Luminanztreppe, bei der die Luminanz der Stufen in gleichen Schritten erhöht wurde. Ähnlich wie in unserem

Experiment wurden verschiedene Masken auf diese Luminanztreppe gelegt, um dann die Sensitivität für beide Reize zu messen und die minimalen Kontrastwerte zu bestimmen, die erforderlich sind, um Kanten und Helligkeitsmuster wahrzunehmen. Die Kontrastwerte zur Erkennung von Kanten waren geringer als die Werte zur Wahrnehmung von Helligkeitsmustern, was darauf hindeutet, dass die Proband*innen besser darin waren, die Kanten wahrzunehmen. Diese Ergebnisse stimmen mit unseren eigenen Daten überein, da die Teilnehmer*innen in unserer Studie ebenfalls eine höhere Sensibilität für Kanten zeigten. In der Studie wurde auch festgestellt, dass das Vorhandensein und das Aussehen von Kanten in ihren Stimuli einen direkten Einfluss darauf hatte, wie das visuelle System der Proband*innen die Helligkeit der Stimuli wahrgenommen hat.

In der Studie von Masuda et al. (2011) wurde untersucht, inwiefern die Cornsweet-Illusion auftritt, wenn die Sichtbarkeit der zentralen Cornsweet-Kante manipuliert wird. Dafür wurden mehrere Proband*innen getestet, und die Ergebnisse zeigen, dass die Cornsweet-Illusion bei den Stimuli mit veränderter Sichtbarkeit kaum noch auftritt. Somit ist die zentrale Kante ein wichtiger Bestandteil dieser Illusion, denn ohne diese sehen die beiden Bereiche links und rechts der Kante aus wie ohne Illusion. Dies könnte darauf hindeuten, dass Kanten Helligkeitsunterschiede bedingen, da ohne die zentrale Cornsweet-Kante kein Helligkeitsunterschied wahrgenommen werden kann bzw. die Illusion nur sehr selten auftritt, wenn die Cornsweet-Kante maskiert wird. Diese Schlussfolgerung stützt die aufgestellten Vermutungen dieser Thesis. In einer unserer drei Cornsweet-Kanten kann ebenfalls eine Cornsweet-Illusion auftreten, aber ob diese Illusion einen Unterschied gemacht hat bei den Ergebnissen dieser Thesis, kann mit dem Experimentaldesign nicht gesagt werden.

Die statistische Überprüfung ergab nicht nur, dass die beiden Experimente signifikant voneinander abweichen und die Proband*innen eine erhöhte Sensitivität für Kanten aufweisen, sondern auch, dass sich die drei Cornsweet-Kanten in ihrer Effektivität voneinander unterscheiden. Die ANOVA zeigt nur an, dass es diesen Unterschied gibt, aber nicht zwischen welchen Cornsweet-Kanten dieser Unterschied spezifisch existiert. Der Post-Hoc-Test aus Tabelle 1 zeigt, dass sich die Cornsweet-Kante mit geringer räumlicher Frequenz signifikant von den anderen Kantenarten unterscheidet. Die beiden anderen Kanten unterscheiden sich nicht bedeutend voneinander. In Abbildung 10, bei den Schwellenwerten beider Experimente, kann man sehen, dass die Werte der Cornsweet-Kante mit geringer räumlicher Frequenz im Durchschnitt höher sind als die Schwellenwerte der anderen beiden Cornsweet-Kanten, selbst bei den Werten ohne Rauschmaske. Mit dem Fakt, dass sich diese Kante von den anderen beiden unterscheidet, deutet dies darauf hin, dass es den Proband*innen bei dieser Art von Cornsweet-Kante schwerer gefallen ist, Kanten und Helligkeiten wahrzunehmen. Die Cornsweet-Kante mit geringer räumlicher Frequenz ist ebenfalls die Kante, bei der eine Cornsweet-Illusion auftreten kann. Kurz noch einmal zusammengefasst beschreibt die Cornsweet-Illusion ein Phänomen der visuellen Wahrnehmung, bei dem die wahrgenommene Helligkeit eines Objekts beziehungsweise Stimulus durch eine eingefügte Luminanzkante beeinflusst wird. Intuitiv könnte man vermuten, dass es den Proband*innen leichter fallen sollte, die Polarität zu beurteilen, wenn diese Illusion auftritt, da die Illusion dafür sorgen sollte, dass der komplette Stimulus diese Polarität

aufweist und nicht nur der Bereich, wo die Cornsweet-Kante eingefügt wird. Ungeachtet des möglichen Auftretens dieser Illusion zeigen die Schwellenwerte für diese Cornsweet-Kante jedoch die höchsten Werte insgesamt. Offensichtlich hatte die Cornsweet-Illusion entweder keinen bemerkenswerten Effekt auf unsere Proband*innen oder sie hatte einen entgegengesetzten Effekt, der es erschwerte, sowohl die Position der Kante als auch ihre Polaritäten zu erkennen. Leider kann durch die gewählten Methoden der beiden Experimente nicht gezeigt werden, ob die Cornsweet-Illusion überhaupt auftrat. Der tatsächliche Effekt der Cornsweet-Illusion auf die Wahrnehmung der beiden Reize könnte in einem weiterführenden Experiment überprüft werden. Man könnte zum Beispiel ein ähnliches Experiment wie in dieser Thesis durchführen, wobei die Frage an die Proband*innen geändert wird, um zu erfragen, ob eine Illusion aufgetreten ist. Die Daten von diesem neuen Experiment könnten dann mit den beiden Daten verglichen werden, um zu überprüfen, ob die Cornsweet-Illusion einen guten oder schlechten Effekt auf die Sensitivität für Kanten und Helligkeiten hat.

Es konnte keine signifikante Interaktion zwischen der Aufgabe und den Cornsweet-Kanten gefunden werden. Das heißt, die Änderung der Aufgabe verursacht keine besonderen Änderungen der Resultate der Proband*innen. Dies kann man gut an Abbildung 11 erkennen bei den Schwellenwerten, es gibt zwischen den verschiedenen Aufgaben und Cornsweet-Kanten keine besonderen Veränderungen, da die Kurven einen relativ ähnlichen Verlauf aufweisen. Es gäbe zum Beispiel eine signifikante Interaktion, wenn eine der Kanten bei einem der Experimente extrem hohe Schwellen und bei dem anderen Experiment extrem niedrige Schwellen aufweisen würde. Dies ist bei uns jedoch nicht der Fall.

5.1 Limitationen

Aufgrund der Struktur der beiden Experimente ist es uns nicht möglich, direkt zu messen, inwieweit ein kausaler Zusammenhang zwischen den Prozessen der Kanten- und Helligkeitswahrnehmung besteht. Die getroffenen Aussagen in der Auswertung basieren auf Vermutungen, die durch den Vergleich der beiden Experimente aufgestellt werden. Um sicherzustellen, dass tatsächlich ein kausaler Zusammenhang zwischen den beiden Reizen besteht, müssten die Experimente entsprechend angepasst werden. Eine Möglichkeit wäre beispielsweise die Durchführung eines gezielten Experiments, das genau diese Fragestellung bezüglich der Kausalität untersucht. Wie bereits erwähnt, wurde in der Studie von Peromaa und Laurinen (2004) festgestellt, dass sich die Wahrnehmung der Helligkeit je nach Aussehen der Kante in den Stimuli verändert hat. Dies deutet darauf hin, dass es einen kausalen Zusammenhang zwischen diesen beiden Reizen geben könnte. In der Studie von Masuda et. al (2011) wurde gezeigt, dass die zentrale Kante einer Cornsweet-Illusion ein wichtiger Bestandteil ist, da in vielen Fällen ohne diese Kante keine Illusion auftritt. Mit einem weiterführenden Experiment in diese Richtung, könnte geprüft werden, inwiefern ein kausaler Zusammenhang zwischen der Cornsweet-Kante und der Wahrnehmung der Helligkeiten besteht.

Da die Daten einen signifikanten Unterschied aufweisen, sollte es keinen markanten Unterschied machen, wenn mehr Menschen getestet werden.

5.2 Fazit

In meiner Arbeit hatte ich das Ziel, die Sensitivität des visuellen Systems des Menschen für Kanten und Helligkeiten zu überprüfen. Dafür wurde ein Experiment zur Helligkeitswahrnehmung durchgeführt und mit einem anderen Experiment, welches Kantendetektion getestet hat, verglichen. Die Ergebnisse haben ein klares Muster gezeigt: Die Proband*innen waren durchgehend besser darin, Kanten zu entdecken, als die Helligkeiten zu bestimmen. Dies lässt darauf schließen, dass das visuelle System empfindlicher für Kanten ist und dass Kanten benötigt werden, um Luminanzunterschiede wahrzunehmen. Kanten bedingen also die Wahrnehmung von Helligkeiten bei uns Menschen. Verschiedene Studien unterstützen diese Aussage und kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Die Frage, warum Kanten Helligkeiten bedingen, bleibt jedoch unbeantwortet und erfordert weiterführende Forschung in diesem Themengebiet.

Literaturverzeichnis

- Adelson, E. H. (2000). Lightness Perception and Lightness Illusions. *The New Cognitive Neurosciences, 2nd Edition*, 339–351. <https://doi.org/10.7551/mitpress/8029.001.0001>
- Betz, T. (2016). Arguments for a new early vision model of lightness perception. <https://doi.org/10.14279/depositonce-5104>
- Biomedical-Imaging-Group. (n.d.). cells. <http://bigwww.epfl.ch/demo/ip/demos/edgeDetector/>
- Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8*(6), 679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
- Cornsweet, T. N. (1970). Visual Perception.
- Enoch, J., McDonald, L., Jones, L., Jones, P. R. & Crabb, D. P. (2019). Evaluating Whether Sight Is the Most Valued Sense. *JAMA ophthalmology*, 137(11), 1317–1320. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2019.3537>
- Hesse, G. & Georgeson, M. (2005). Edges and bars: where do people see features in 1-D images? *Vision Research*, 45(4), 507–525. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.09.013>
- Kanopoulos, N., Vasanthavada, N. & Baker, R. (1988). Design of an image edge detection filter using the Sobel operator. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 23(2), 358–367. <https://doi.org/10.1109/4.996>
- Link, S. (2001). Psychophysical Theory and Laws, History of (N. J. Smelser & P. B. Baltes, Hrsg.), 12439–12444. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/00676-8>
- Masuda, A., Watanabe, J., Terao, M., Watanabe, M., Yagi, A. & Maruya, K. (2011). Awareness of Central Luminance Edge is Crucial for the Craik-O’Brien-Cornsweet Effect. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00125>
- Owsley, C. (2003). Contrast sensitivity. *Ophthalmology clinics of North America*, 16(2), 171–177. [https://doi.org/10.1016/s0896-1549\(03\)00003-8](https://doi.org/10.1016/s0896-1549(03)00003-8)
- Peromaa, T.-L. & Laurinen, P. I. (2004). Separation of edge detection and brightness perception. *Vision Research*, 44(16), 1919–1925. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.03.005>
- Schmittwilken, L., Wichmann, F. A. & Maertens, M. (2023). Is edge sensitivity more than contrast sensitivity? *unpublished Paper*.
- Tolhurst, D. & Dealy, R. (1975). The detection and identification of lines and edges. *Vision Research*, 15(12), 1367–1372. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(75\)90192-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(75)90192-3)
- Wichmann, F. A. & Hill, N. J. (2001). The psychometric function: I. Fitting, sampling, and goodness of fit. *Perception and Psychophysics*, 63, 1293–1313. <https://doi.org/10.3758/BF03194544>

- Xie, S. & Tu, Z. (2015). Holistically-Nested Edge Detection. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) 2015*, 1395–1403. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.164>
- Yang, D., Peng, B., Al-Huda, Z., Malik, A. & Zhai, D. (2022). An overview of edge and object contour detection. *Neurocomputing*, 488, 470–493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.02.079>

Appendix

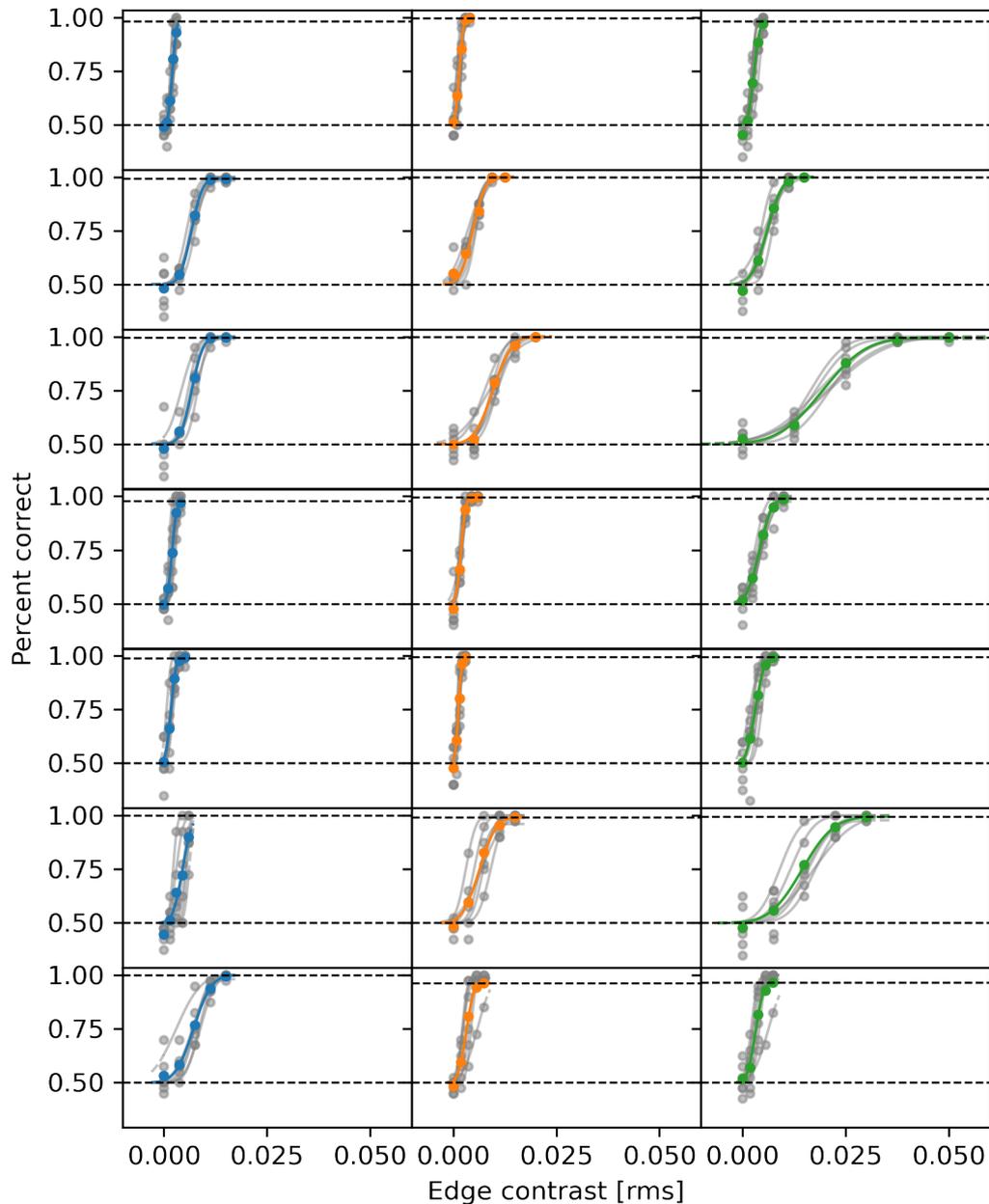


Abbildung 11: psychometrische Funktionen der Proband*innen vom Kantendetektionsexperiment. x-Achse zeigt den genutzten Kontrast, y-Achse die Korrektheit der Antworten. Die gestrichelten Linien markieren den höchsten und niedrigsten, durchschnittlich erreichten Wert. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: (1) HSF, (2) MSF, (3) LSF. Reihen sind die verschiedenen Masken von oben nach unten: (1) keine Maske, (2) White, (3) Pink, (4) Brown, (5) Narrowband LSF, (6) Narrowband MSF, (7) Narrowband HSF.

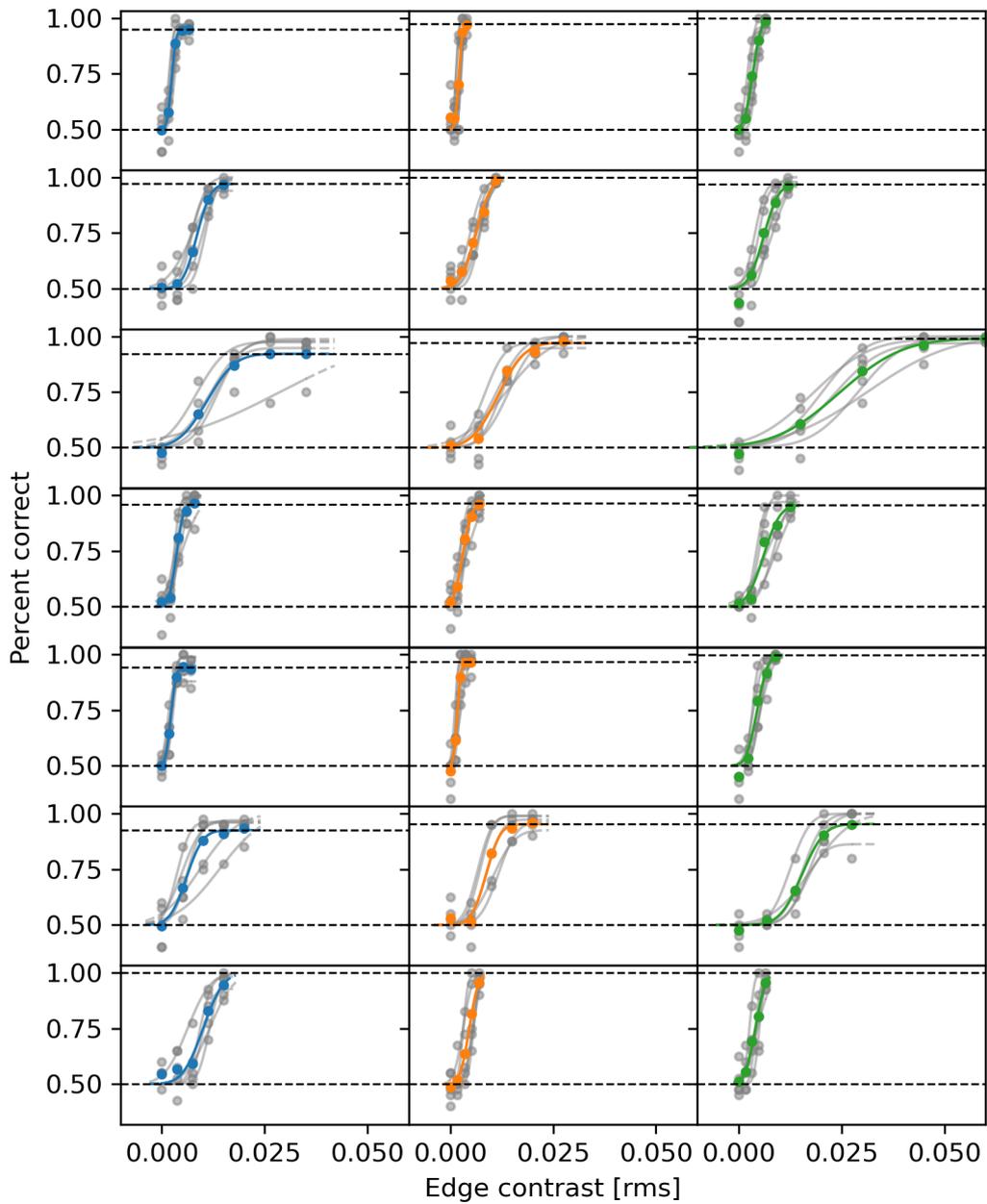


Abbildung 12: psychometrische Funktionen der Proband*innen vom Polaritätsexperiment. x-Achse zeigt den genutzten Kontrast, y-Achse die Korrektheit der Antworten. Die gestrichelten Linien markieren den höchsten und niedrigsten, durchschnittlich erreichten Wert. Spalten spiegeln die Cornsweet-Kante wider von links nach rechts: (1) HSF, (2) MSF, (3) LSF. Reihen sind die verschiedenen Masken von oben nach unten: (1) keine Maske, (2) White, (3) Pink, (4) Brown, (5) Narrowband LSF, (6) Narrowband MSF, (7) Narrowband HSF.