



Vergleich ausgewählter Helligkeitsphänomene: Modellbasierte Vorhersagen und psychophysische Messungen

Thesis zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B. Sc.) im Studiengang Informatik

vorgelegt von

Marcus Bindermann

Technische Universität Berlin
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
Institut für Technische Informatik und Mikroelektronik

Abgabetermin: 20. Februar 2022

Erstgutachterin: Prof. Dr. Marianne Maertens
Technische Universität Berlin
FG Computational Psychology

Zweitgutachter: Prof. Dr. Felix Wichmann
Eberhard Karls Universität Tübingen
AG Neuronale Informationsverarbeitung

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 20. Februar 2022

Marcus Bindermann

Zusammenfassung

Wenn beim Sehen die physische Umwelt mit dem menschlichen Organismus in Kontakt tritt, ist Licht der Träger der Informationen aus dieser Umwelt. Die Frage, wie Menschen ihre Umwelt visuell wahrnehmen, hängt deshalb unter anderem davon ab, wie Objekte in dieser Umwelt das Licht reflektieren. Denn die visuelle Wahrnehmung beginnt, wenn das von der Umwelt reflektierte Licht auf die lichtempfindlichen Zellen der menschlichen Netzhaut auftrifft. Das Ergebnis dieses Wahrnehmungsprozesses kann jedoch bislang von der Wissenschaft nicht vollständig erklärt werden. So führen unter anderem verschiedene visuelle Effekte dazu, dass Menschen gleich helle Flächen unterschiedlich hell wahrnehmen.

Durch Computermodelle wird versucht, die Wirkung solcher visuellen Effekte zu erfassen und so die Helligkeitswahrnehmung des Menschen vorherzusagen. Das bekannteste Modell für solche Vorhersagen ist das Oriented difference-of-Gaussian (ODOG)-Modell. Mithilfe dieses Modells kann die relative Helligkeit von Flächen in Eingabebildern berechnet und so eine Vorhersage modelliert werden, wie hell diese Flächen von Menschen wahrgenommen werden. Um zu bewerten, wie genau das ODOG-Modell verschiedene Effekte bei der Wahrnehmung korrekt berücksichtigen kann, müssen die Modellvorhersagen für verschiedene Eingabebilder mit der Wahrnehmung von Menschen verglichen werden.

Bisher wurden solche Vergleiche häufig nur mit ausgewählten Eingabebildern durchgeführt. Gleichzeitig wurde beim Bewerten der Vorhersage häufig auf Daten zurückgegriffen, die in verschiedenen Experimenten oder nur von einer geringen Zahl an Versuchspersonen erhoben worden waren. Jedoch ist bekannt, dass Menschen insbesondere die Intensität von Helligkeitsillusionen sehr unterschiedlich wahrnehmen. Zudem lassen Daten, die in verschiedenen Experimenten erhoben wurden, nur einen eingeschränkten Vergleich der jeweiligen Modellvorhersagen zu.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für zehn verschiedene Reize die Helligkeitswahrnehmung von 27 Versuchspersonen in einem psychophysischen Experiment gemessen und zum Vergleich die ODOG-Vorhersagen modelliert. Bei den untersuchten Reizen handelte es sich um Stimuli, denen unterschiedliche Effekte bei der Wahrnehmung zugrunde lagen. Diese Stimuli enthielten jeweils zwei Testfelder in gleicher Helligkeit. Die Versuchspersonen bewerteten die von ihnen wahrgenommene Helligkeit für beide Testfelder. Nahmen die Versuchspersonen diese unterschiedlich hell wahr, entstand bei der Wahrnehmung also die Illusion eines Helligkeitsunterschiedes. Diese Illusionen wurden hinsichtlich ihrer Richtung (Welches Testfeld wirkt heller als das andere?) und hinsichtlich ihrer Intensität (Wie stark ist der zwischen den Testfeldern wahrgenommene Helligkeitsunterschied?) bewertet. Zudem wurde untersucht, wie stark die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeitsillusionen variieren und ob Paare von Stimuli hinsichtlich der Helligkeitsillusionen untereinander korrelieren.

Für alle Stimuli entsprachen die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionsrichtungen den in der Literatur beschriebenen oder den erwarteten. Für sieben dieser zehn Stimuli sagte das ODOG-Modell die Richtung der Illusion so vorher, wie sie überwiegend auch von den Versuchspersonen wahrgenommen wurde. Die Intensitäten der Illusionen in den Stimuli nahmen die Versuchspersonen wie erwartet sehr unterschiedlich wahr. Dennoch ließen die experimentell erhobenen Daten für neun der zehn Stimuli einen eindeutigen Schluss zu, wie intensiv die Mehrheit der Versuchspersonen die Illusionen in den Stimuli wahrnahm. Das ODOG-Modell konnte die Intensität der wahrgenommenen Illusionen jedoch in den meisten Fällen nicht korrekt vorhersagen. Darüber hinaus konnte anhand der experimentellen Ergebnisse berechnet werden, dass es Paare von Stimuli gibt, für die die wahrgenommenen Illusionsintensitäten stark korrelierten.

Die Ursachen solcher starken Korrelationen könnten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Künftige Arbeiten könnten anhand der Messwerte zudem untersuchen, warum die ODOG-Modellierung hinsichtlich der Illusionsrichtung für drei der zehn Stimuli nicht zutraf und warum die Illusionsintensität in den meisten Stimuli deutlich unter- oder überschätzt wurde.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Helligkeitswahrnehmung: Begriffe und Effekte	1
1.1.1 Illuminanz, Reflektanz, Luminanz und wahrgenommene Helligkeit	1
1.1.2 Simultaner Helligkeitskontrast und White-Täuschung	2
1.1.3 Helligkeitskonstanz	2
1.2 Gegenstand und Motivation	3
1.3 Das Oriented difference-of-Gaussian (ODOG)-Modell	4
1.3.1 Die Schritte des ODOG-Modells	4
1.3.2 Die Vorhersage des ODOG-Modells	5
1.4 Fragestellungen	6
2 Methode	9
2.1 Stimuli und Versuchsaufbau	9
2.1.1 Auswahl der untersuchten Stimuli	9
2.1.2 Effekte in den Stimuli	10
2.1.3 Erzeugen und Anpassen der Stimuli	11
2.1.4 Berechnen der Eingabewerte für die Luminanz	12
2.1.5 Berechnen des Sehwinkels	12
2.1.6 Versuchsaufbau	13
2.2 Versuchsablauf	14
2.3 Berechnen der ODOG-Modellvorhersage	16
2.4 Datenschutz und Ethik	16
3 Ergebnisse	19
3.1 Experimentelle Ergebnisse	19
3.1.1 Streuung der gewählten Helligkeiten für die Testfelder	19
3.1.2 Mittelwerte der gewählten Helligkeiten der Testfelder	21
3.1.3 Intensität der Helligkeitsillusionen innerhalb der Stimuli	21
3.1.4 Interpretation der experimentellen Ergebnisse	24
3.2 ODOG-Modellvorhersage	26
3.2.1 Ergebnisse der ODOG-Modellvorhersage	26
3.2.2 Vergleich zwischen den experimentellen Ergebnissen und der ODOG-Modellvorhersage	26
3.3 Zusammenhangsanalyse	28
3.3.1 Korrelation hinsichtlich der Intensität der Helligkeitsillusionen	28
3.3.2 Kontingenz hinsichtlich der Richtung der Helligkeitsillusionen	32
4 Diskussion	35
4.1 Methodischer Ansatz und Qualität der Daten	35
4.2 Aussagekraft und Begrenztheit der gewonnenen Daten	35
4.3 Ausblick	36
Literaturverzeichnis	39
Abbildungsverzeichnis	41
Tabellenverzeichnis	43
A Anhang	45
A.1 Von den Versuchspersonen gewählte Helligkeiten der Testfelder	45
A.2 Teilnahmeinformationen und Einverständniserklärung für die Versuchspersonen	47
A.3 Bescheinigung der Ethikkommission	48

1 Einleitung

Menschen sind mithilfe ihrer Sinne in der Lage, von der Umwelt ausgesandte Informationen aufzunehmen. Im menschlichen Gehirn wird aus diesen Informationen ein Abbild der Umwelt erzeugt. Dieser Vorgang wird als Wahrnehmung bezeichnet. Bei der visuellen Wahrnehmung, also dem Sehen, ist das Licht der Träger der Informationen aus der Umwelt. Licht kann einen natürlichen oder künstlichen Ursprung haben. Natürliche Lichtquellen sind beispielsweise die Sonne, Sterne oder Feuer. Künstliche Lichtquellen können Glühbirnen, Leuchtdioden oder Kerzen sein. Physikalisch betrachtet handelt es sich bei Licht um Energie, die in Form elektromagnetischer Wellen von der Lichtquelle an die Umgebung abgegeben wird. Die Ausbreitung von Wellen wird als Strahlung bezeichnet. Wenn die Lichtstrahlung auf das menschliche Auge trifft, beginnt der eigentliche Sehprozess. Im Auge gelangt der Lichtstrahl durch Hornhaut, Linse und Glaskörper auf die Netzhaut. Auf der Netzhaut wandeln lichtempfindliche Sehzellen das Licht dann in Nervenimpulse um. Diese Impulse werden über den Sehstrang schließlich an das Sehzentrum im Gehirn weitergeleitet (Ditzinger 2013).

1.1 Helligkeitswahrnehmung: Begriffe und Effekte

Die Frage, wie Menschen ihre Umwelt visuell wahrnehmen, hängt vorrangig von zwei Faktoren ab: Zum einen, wie diese Umwelt durch eine Lichtquelle ausgeleuchtet wird. Und zum anderen, wie Objekte in dieser Umwelt das Licht reflektieren (Ditzinger 2013).

1.1.1 Illuminanz, Reflektanz, Luminanz und wahrgenommene Helligkeit

Abbildung 1 zeigt eine Lichtquelle, die Sonne, ein Objekt, dessen verschiedene Teile das Licht unterschiedlich reflektieren, sowie das menschliche Auge mit lichtempfindlichen Zellen, den Rezeptoren. Die Lichtquelle sendet eine Lichtmenge mit einer bestimmten Illuminanz aus. Die verschiedenen Oberflächen des Objektes reflektieren jeweils einen bestimmten Teil des einfallenden Lichts, der dann zum Auge gelangt. Dort werden die Helligkeiten der Oberflächen dann vom Menschen wahrgenommen.

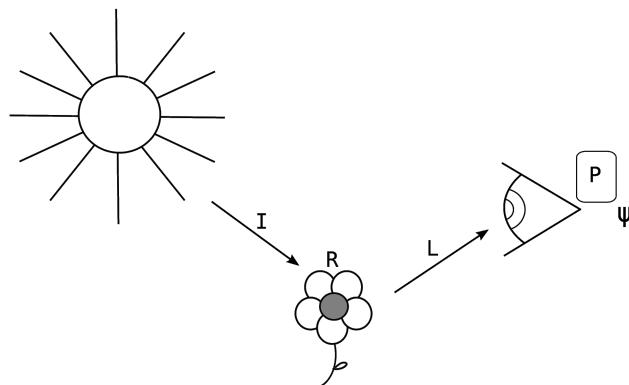


Abbildung 1: Der Zusammenhang zwischen Illuminanz (I), Reflektanz (R), Luminanz (L), dem Wahrnehmungsprozess (P) und der wahrgenommenen Helligkeit (Ψ): Illuminanz ist die Lichtmenge, die auf eine Oberfläche einfällt. Reflektanz ist der Anteil dieser Lichtmenge, der von der Oberfläche zurückgeworfen wird. Luminanz ist das Produkt aus dem Reflektanzgrad der Oberfläche und der Intensität der Illumination. Gelangt diese Luminanz zum Auge, findet der Wahrnehmungsprozess statt, dessen Ergebnis unter anderem die wahrgenommene Helligkeit ist.¹

1. Die Darstellung wurde mit Anpassungen übernommen von Carolin Brunn: https://github.com/computational-psychology/brunn_ba2020/blob/main/brunn_ba2020.pdf, abgerufen am 13. Juli 2021.

Bei der Wahrnehmung von Helligkeit kann zwischen „lightness“ und „brightness“ unterschieden werden. „Lightness“ ist wahrgenommene Reflektanz, „brightness“ wahrgenommene Luminanz. Im Deutschen wird beides als Helligkeit bezeichnet. Luminanz ist die physikalische Lichtmenge oder -intensität, die auf das Auge trifft. Die Luminanz errechnet sich aus dem Produkt des Reflektanzgrades einer Oberfläche und der Intensität der Illumination. Der Reflektanzgrad gibt an, welche Menge des einfallenden Lichts von der Oberfläche zurückgeworfen wird. Weiße Oberflächen reflektieren etwa 90 Prozent des einfallenden Lichts, schwarze Oberflächen hingegen nur etwa 3 Prozent. Der Reflektanzgrad einer Oberfläche kann also etwa um den Faktor 30 variieren. Die Illuminanz hingegen, also die auf eine Oberfläche einfallende Lichtmenge, kann um einen Faktor von 100 Millionen variieren. Es gibt somit unüberschaubar viele Kombinationen für das Produkt aus Reflektanz und Illuminanz, um dieselbe Luminanz zu erzeugen (Gilchrist 2006).

Zudem kann Licht jeder Intensität eine Oberfläche in jedem erdenklichen Grauton erscheinen lassen. So können beispielsweise weißes Papier im Schatten und schwarzes Papier in hellem Licht die identische Lichtmenge zum Auge reflektieren. „Dennoch erscheint [für den menschlichen Betrachter] das schwarze Papier schwarz und das weiße Papier weiß“ (S. 4). Die Reflektanzeigenschaft der Oberfläche wird also korrekt wahrgenommen.

1.1.2 Simultaner Helligkeitskontrast und White-Täuschung

Die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche hängt nicht nur von ihrer Luminanz ab, sondern auch von den Luminanzen der benachbarten Regionen. Beispiele für solche Kontexteffekte sind der Simultane Helligkeitskontrast und die White-Täuschung.

Beim Simultanen Helligkeitskontrast wird ein Helligkeitsunterschied zwischen zwei Flächen simultan, also gleichzeitig, verstärkt wahrgenommen (Gilchrist 2006). Dieses Phänomen lässt sich in der Abbildung 2 (a) beobachten: Innerhalb eines schwarzen und eines weißen Rechtecks sind mittig zwei quadratische Testfelder platziert. Obwohl beide Testfelder denselben Grauton haben, wirkt das Quadrat innerhalb der schwarzen Fläche heller und das Quadrat innerhalb der weißen Fläche dunkler. Der Helligkeitsunterschied zwischen den Quadraten und den sie umgebenden Flächen wird also verstärkt wahrgenommen.

Bei der White-Täuschung hingegen nähert sich die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche der Helligkeit benachbarter Regionen an (Gilchrist 2006). Ein solches Phänomen lässt sich in Abbildung 2 (b) beobachten. Dabei handelt es sich um eine Variante der White-Illusion (White 1979). Bei dieser Variante sind schwarze und weiße Balken alternierend vertikal nebeneinander angeordnet. Auf einem schwarzen und einem weißen Balken ist jeweils ein graues Testfeld platziert, welches dieselbe Breite wie der Balken hat. Das linke Testfeld innerhalb des schwarzen Balkens ist seitlich von weißen Flächen umgeben. Das rechte Testfeld innerhalb des weißen Balkens ist seitlich von schwarzen Flächen umgeben. Beide Testfelder haben denselben Grauton. Dennoch wirkt das linke Testfeld heller als das rechte. Der wahrgenommene Helligkeitsunterschied zu den vertikal angrenzenden Flächen wird also abgeschwächt.

1.1.3 Helligkeitskonstanz

Helligkeitskonstanz bezeichnet den Effekt, dass die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche annähernd konstant bleibt, auch wenn sich die Beleuchtung und damit die Luminanz der Oberfläche ändern. Das gleiche geschieht, wenn sich die Helligkeit der die Oberfläche umgebenden Bereiche ändert (Gilchrist 2006). Die betrachtende Person erkennt also, dass die Oberfläche unter verschiedenen Beleuchtungen dieselbe Reflektanz hat. Erreicht wird dieser Effekt dadurch, dass das visuelle System die unterschiedlichen Helligkeiten der verschiedenen Oberflächen vergleicht und die Helligkeitsunterschiede entweder relativ oder absolut vergleicht. Relativ meint den unmittelbaren Vergleich, ob eine Fläche heller oder dunkler als die andere ist. Absolut ist die Einschätzung verglichen mit allen darstellbaren Helligkeitswerten, also von Weiß über alle Grautöne bis zu Schwarz (Kingdom 2011).

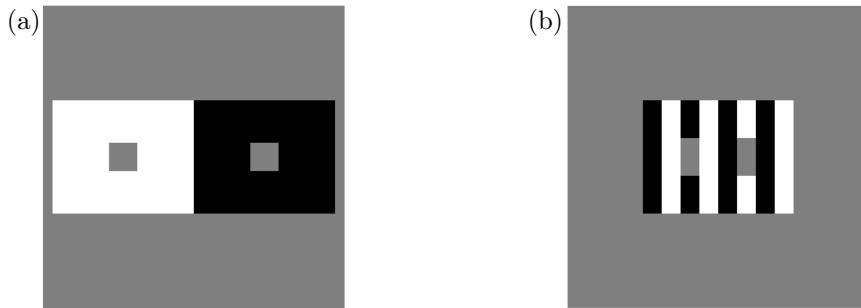


Abbildung 2: Beispiele für Kontexteffekte bei der Helligkeitswahrnehmung, mit Anpassungen übernommen von Robinson et al. (2007): (a) Simultaner Helligkeitskontrast: Die wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede zwischen den Quadraten und den sie umgebenden Flächen werden verstärkt. Das graue Quadrat innerhalb der schwarzen Fläche wirkt heller als das graue Quadrat innerhalb der weißen Fläche. (b) White-Täuschung: Die wahrgenommene Helligkeit der Rechtecke nähert sich scheinbar der Helligkeit der sie umgebenden Flächen an. Das graue Rechteck innerhalb des schwarzen Balkens ist mehr von weißen Flächen umgeben und wirkt heller als das größtenteils von schwarzen Flächen umgebene Rechteck innerhalb des weißen Balkens.²

1.2 Gegenstand und Motivation

Beim Sehen tritt die physische Umwelt mit dem menschlichen Organismus in Kontakt. Dabei trifft das von der Umwelt reflektierte Licht auf die lichtempfindlichen Zellen der menschlichen Netzhaut. Das Ergebnis dieser visuellen Wahrnehmung, also des menschlichen Sehens, kann jedoch bisher von der Wissenschaft nicht vollständig erklärt werden (Gilchrist 2006). So ist es in vielen Fällen nicht bekannt, warum eine betrachtende Person die Reflektanz einer Oberfläche korrekt wahrnimmt, deren Luminanz jedoch nicht. Diese Diskrepanz entsteht unter anderem, weil das visuelle System des Menschen die physische Welt nicht so darstellt, wie sie ist, sondern es Annahmen über diese Welt macht. Eine solche Annahme ist beispielsweise, dass obwohl der Mensch ein zweidimensionales Bild auf einem Bildschirm sieht, die reale Welt eben nicht zwei-, sondern dreidimensional ist. Deshalb wandelt das Gehirn die Elemente des Bildes in dreidimensionale Objekte um, so wie sie in der physischen Welt wahrnehmbar wären (Snowden et al. 2012).

Ein Beispiel für ein solches Phänomen ist die im linken Bild in Abbildung 3 dargestellte, sogenannte Checkershadow-Illusion. Die mit A und B markierten Quadrate haben dieselbe Luminanz, also dieselbe Helligkeit, wie die zum Beweis eingefügten Balken im rechten Bild verdeutlichen. Dennoch – und das ist die vermeintliche Täuschung – erscheint das eine Quadrat der Schachbrettoberfläche heller als das andere (Gilchrist 2006). Es ist allerdings fraglich, ob es sich hier wirklich um eine Täuschung handelt, wenn die betrachtende Person zwei Quadrate mit demselben Grauwert unterschiedlich hell wahrnimmt. Denn betrachten wir die dargestellte Szene genauer: Ein Kreiszylinder steht auf einer ebenen Fläche mit einem Schachbrett muster. Die Quadrate A und B haben (wie bei Schachbrettern üblich) tatsächlich unterschiedliche Grautöne. Die Wahrnehmung, dass beide Quadrate unterschiedliche Grauwerte haben, ist also korrekt. Stellt man sich die Abbildung räumlich vor, so fällt Licht vom rechten oberen Bildrand in die Szene ein. Das mit A markierte Quadrat absorbiert das einfallende Licht und reflektiert einen Teil scheinbar zum Auge der betrachtenden Person zurück. Das mit B markierte Quadrat hingegen liegt im Schatten des Kreiszylinders. Die Täuschung ist also, dass obwohl beide Quadrate unterschiedliche Grauwerte haben, sie

2. Der Quellcode für die Berechnungen und die Visualisierungen dieses Kapitels ist unter https://git.tu-berlin.de/bindermann/bsc_brightness_illusions/-/blob/main/1_einleitung.ipynb abrufbar.

dieselbe Helligkeit haben. Es entsteht also die Illusion einer unterschiedlichen Luminanz (Snowden et al. 2012).

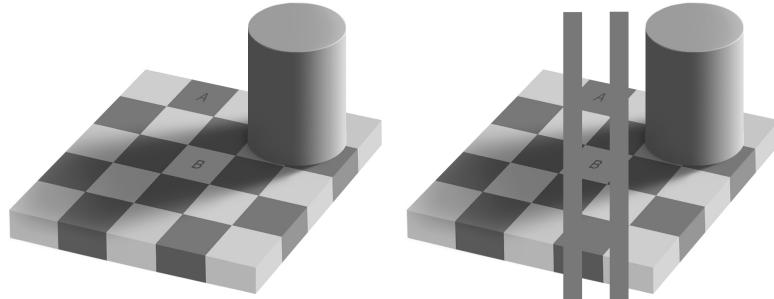


Abbildung 3: Die Checkershadow-Illusion³ von Edward H. Adelson: Die mit A und B markierten Quadrate haben dieselbe Luminanz, also dieselbe Helligkeit, wie die zum Beweis eingefügten Balken im rechten Bild verdeutlichen. Dennoch erscheint das eine Quadrat heller als das andere. Die Täuschung ist, dass beide Quadrate zwar einen unterschiedlichen Grauton, aber dieselbe Helligkeit haben.

Durch Computermodelle wird versucht, die Helligkeitswahrnehmung des Menschen vorherzusagen. Die Vorhersagen dieser Modelle sind gut – in gewisser Weise sogar zu gut, sodass sie die „Fehler“ in der menschlichen Wahrnehmung nicht mehr wiedergeben. Gerade aber diese „Fehler“, die für die betrachtende Person zu optischen Illusionen oder Täuschungen in ihrer Wahrnehmung führen, können entscheidende Hinweise geben, wie das menschliche Sehen funktioniert (Gilchrist 2006). Solche Illusionen sind also ein gutes Mittel, um die Funktionsweise des visuellen Systems des Menschen genauer zu untersuchen (Snowden et al. 2012). Allerdings sind die Modelle in ihrem Umfang beschränkt und können häufig nur ausgewählte Mechanismen der Wahrnehmung für eine begrenzte Anzahl von Versuchsreizen berücksichtigen. So können beispielsweise alle Implementierungen von bildbasierten Modellen für die Vorhersage der Helligkeitswahrnehmung nur 2-dimensionale Bilder als Eingabedatum verwenden. Tiefe als räumlicher Aspekt wird dabei nicht berücksichtigt. Das bekannteste Modell für die Vorhersage von menschlicher Helligkeitswahrnehmung ist das ODOG-Modell.

1.3 Das Oriented difference-of-Gaussian (ODOG)-Modell

Das ODOG-Modell wurde 1999 von Barbara Blakeslee und Mark E. McCourt veröffentlicht. Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung des von denselben Autoren zuvor veröffentlichten Difference-of-Gaussian (DOG)-Modells. Mithilfe des ODOG-Modells kann die relative Helligkeit von Testfeldern in Eingabebildern berechnet und so eine Vorhersage für deren wahrgenommene Helligkeit modelliert werden (Blakeslee und McCourt 1999).

1.3.1 Die Schritte des ODOG-Modells

Das ODOG-Modell basiert auf der Anwendung von mehreren, in verschiedener Ausrichtung angeordneten DOG-Filters. Diese bestehen aus zwei zweidimensionalen Gauß-Filters – einem kleineren in der Mitte und einem größeren, umgebenden, deren Differenz gebildet wird. Beim ODOG-Modell wird aus Filtern in sechs Orientierungen und insgesamt sieben räumlichen Skalierungen eine Filterreihe gebildet und auf das Eingabebild angewendet.⁴

3. Die Abbildung wurde übernommen von http://persci.mit.edu/_media/gallery/checkershadow_double_full.jpg, abgerufen am 1. Juni 2021.

4. https://multyscale.readthedocs.io/en/latest/tutorials/demo_filters.html, abgerufen am 5. August 2021.

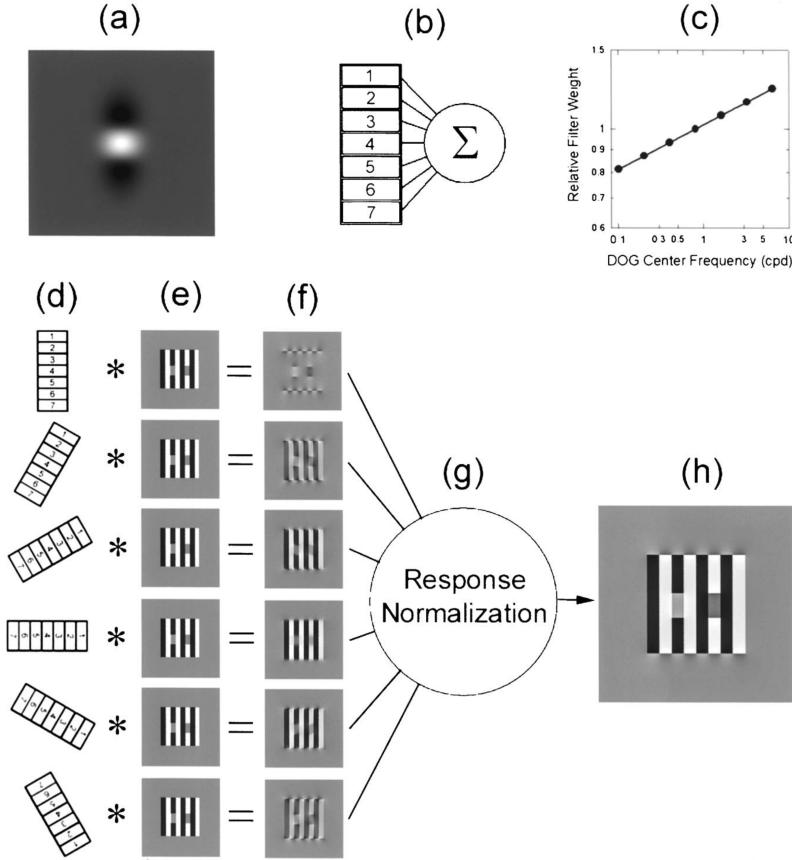


Abbildung 4: Die Schritte des ODOG-Modells am Beispiel der Variante der White-Illusion im Detail: (a) ODOG-Filter, (b)–(e) Anwendung von sieben Filtern in sechs Orientierungen auf das Eingabebild, (f)–(g) Normierung der Differenz aus den Ausgabebildern, (h) Ergebnis der Modellvorhersage. Die Abbildung wurde übernommen von Blakeslee und McCourt (1999).

Die Schritte des ODOG-Modells werden in Abbildung 4 am Beispiel der Variante der White-Illusion visualisiert. Abbildung 4 (a) enthält eine exemplarische Graustufendarstellung eines ODOG-Filters. Sieben dieser Filter werden innerhalb jeder Orientierung nach ihrer Gewichtung über die Frequenz mit einer Potenzfunktion mit einer Steigung von 0.1 addiert (Abbildung 4 (b–c)). Die so aufsummierten Filter werden dann in sechs unterschiedlichen Orientierungen (0° , 30° , 60° , 90° , -30° und -60°) jeweils auf das Eingabebild angewendet (Abbildung 4 (d–e)). Anschließend wird aus den nach der Filteranwendung entstandenen einzelnen Ausgabebildern (Abbildung 4 (f)) eine normierte Differenz gebildet (Abbildung 4 (g)). Das Ergebnis der Filteranwendung ist in Abbildung 4 (h) visualisiert: Es handelt sich dabei um die ODOG-Modellvorhersage für die relative Helligkeitswahrnehmung der Variante der White-Illusion (Blakeslee und McCourt 1999).

1.3.2 Die Vorhersage des ODOG-Modells

In Abbildung 5 ist die Vorhersage des ODOG-Modells zur Modellierung der wahrgenommenen Helligkeit für die zuvor betrachtete Variante der White-Illusion aus Robinson et al. (2007, Abbildung 1 (a)) detailliert visualisiert. Das Ausgangsbild ist eine eigene Implementierung der White-Illusion. Dieses Bild wird durch ein 2-dimensionales Array mit 1024 Zeilen und 1024 Spalten repräsentiert, in dem jede Zelle den Helligkeitswert eines Bildpunktes (Pixel) enthält. Die Helligkeitswerte des Bildes umfassen den Wertebereich einer

8-Bit-Graustufenskala, auf der insgesamt $2^8 = 256$ verschiedene Werte dargestellt werden können. Dabei entspricht der geringste Helligkeitswert von 0 einem schwarzen Bildpunkt, der höchste Helligkeitswert von 255 stellt einen weißen Bildpunkt dar. Alle Bildpunkte in beiden grauen Testfeldern des in Abbildung 5 (a) dargestellten Ausgangsbildes haben einen Helligkeitswert von 128. Die Vorhersage des ODOG-Modells gibt unter anderem an, wie stark die wahrgenommene Helligkeit aller Bildpunkte innerhalb der Testfelder von dem Wert 128 abweicht. In Abbildung 5 (b) ist die Vorhersage für alle Bildpunkte des Ausgangsbildes visualisiert. Die Abbildung 5 (c) stellt die Helligkeitsverläufe des Ausgangsbildes (gepunktete Linie) sowie der Modellvorhersage (gestrichelte Linie) entlang einer horizontalen Linie (repräsentiert durch die Bildpunkte der Zeile 512 und der Spalten von 200 bis 800) dar.⁵ Auf der x-Achse ist die Position des betrachteten Bildpunktes als Spaltenwert dargestellt. Die y-Achse enthält den Helligkeitswert im Intervall zwischen 0 und 255.

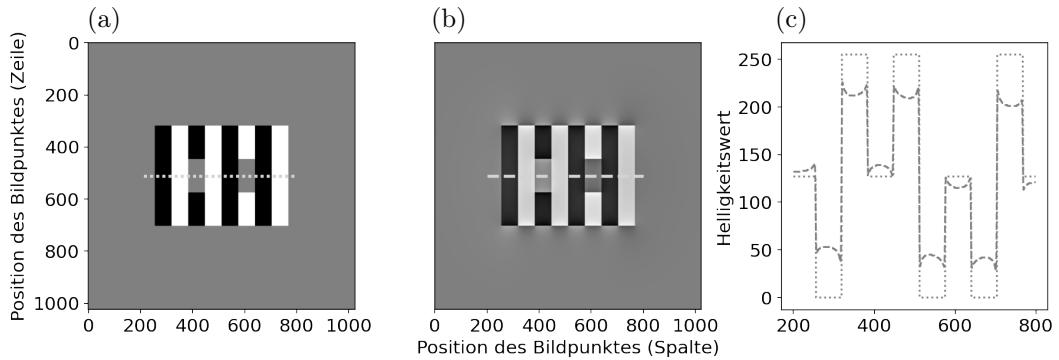


Abbildung 5: Die Vorhersage des ODOG-Modells für die White-Illusion: (a) Ausgangsbild, (b) Vorhersage, (c) Helligkeitsverlauf entlang einer horizontalen Linie (gepunktet: Ausgangsbild, gestrichelt: Modellvorhersage). Auf der x-Achse sind jeweils die Spaltenwerte der Bildpunkte enthalten. Die y-Achsen enthalten den Zeilenwert der Bildpunkte ((a) und (b)) oder den Helligkeitswert im Intervall von 0 bis 255 ((c)).

Der Vergleich des Kurvenverlaufs in Abbildung 5 (c) verdeutlicht, dass entlang der betrachteten Pixelreihe das Modell für das linke Testfeld eine höhere wahrgenommene Helligkeit voraussagt (Scheitelpunkt der Kurve oberhalb der gestrichelten Linie). Das rechte Testfeld wirkt hingegen nach der Vorhersage des Modells dunkler (die Kurve der verläuft unterhalb des Helligkeitsverlaufs des Testfeldes).

Um die Modellvorhersage zur wahrgenommenen Helligkeit des gesamten Testfeldes zu bewerten ist es jedoch nicht repräsentativ, sich auf ausgewählte Bildpunkte entlang einer Linie zu beschränken, die mittig durch das Testfeld verläuft. Deshalb werden die Werte aller Bildpunkte innerhalb des jeweiligen Testfeldes betrachtet und die Mittelwerte beider Testfelder verglichen (Robinson et al. 2007). Für das Eingabebild beträgt dieser Mittelwert für beide Testfelder 128. Objektiv haben also beide Testfelder denselben Grauton. Die Modellvorhersage für die wahrgenommene Helligkeit hat einen Mittelwert von 135 für alle Bildpunkte des linken Testfeldes und 119 für die des rechten. Das ODOG-Modell sagt also voraus, dass das linke Testfeld heller wirkt als das rechte ($135 > 119$).

1.4 Fragestellungen

Das ODOG-Modell wurde bisher hauptsächlich genutzt, um die Richtung von Illusionen vorherzusagen (qualitative Bewertung): Wirkt das Testfeld auf dem schwarzen Hintergrund heller als das Testfeld auf dem weißen Hintergrund (Simultane Helligkeitskontrast)? Oder

5. Anmerkung: Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die vorhergesagten Werte auf ein Intervall von 0 bis 255 normiert. Dieser Schritt ist in der ursprünglichen Implementierung nicht vorgesehen.

wirkt das Testfeld, welches von mehr schwarzer Fläche umgeben ist als von weißer dunkler als das Testfeld, das mehrheitlich von weißer Fläche umgeben ist (White-Täuschung)? Neben der bereits erläuterten White-Täuschung und dem Simultanen Helligkeitskontrast existieren noch weitere Effekte, die Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung haben.

Um einen Vergleich zwischen den Modellvorhersagen und der menschlichen Wahrnehmung einzelner Stimuli zu ermöglichen, ist jedoch eine Quantifizierung des Ausmaßes dieser wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede in den verschiedenen Phänomenen notwendig. Damit kann abgeschätzt werden, ob die Modellvorhersagen für verschiedene Stimuli, denen unterschiedliche Effekte bei der Helligkeitswahrnehmung zugrunde liegen, zutreffend sind.

Robinson et al. (2007) griffen für einen solchen Vergleich auf Ergebnisse aus psychophysischen Messungen zurück, die von Blakeslee und McCourt (1999) publiziert wurden. Blakeslee und McCourt hatten diese Daten in verschiedenen Experimenten erhoben. Robinson et al. (2007) merken jedoch zu diesen Daten an, dass trotz aller methodischer Ähnlichkeit die Nutzung von Ergebnissen aus verschiedenen Experimenten nur einen vorsichtigen Vergleich der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Intensität der Phänomene zulässt (quantitative Bewertung). So könnten genaue Schlussfolgerungen nur gezogen werden, wenn Daten verglichen würden, die innerhalb einer Studie mit denselben Versuchspersonen gesammelt wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden solche Daten von denselben Versuchspersonen für unterschiedliche Versuchsreize (Stimuli mit Testfeldern) in einem Experiment erhoben. Ziel war es, die Intensität von Wahrnehmungseffekten in verschiedenen Stimuli an einer größeren Gruppe von Versuchspersonen zu untersuchen. Bei dem durchgeführten Experiment handelt es sich um eine psychophysische Messung. Psychophysik befasst sich mit dem Verhältnis zwischen physischen Reizen und deren subjektiver Wahrnehmung. Psychophysische Messungen dienen der Untersuchung oder Quantifizierung dieses Verhältnisses zwischen Reiz und Wahrnehmung (Kingdom und Prins 2010).

Die Ergebnisse der psychophysischen Messungen ermöglichen einen genaueren Vergleich der Modellvorhersagen mit der menschlichen Wahrnehmung. Darüber hinaus wurde untersucht, inwiefern Menschen die Richtung und Intensität von Helligkeitsillusionen gleich oder verschieden wahrnehmen. Dies könnte Hinweise liefern, inwiefern die Wahrnehmung verschiedener Stimuli auf denselben oder unterschiedlichen perzeptuellen Mechanismen beruhen. Zudem kann damit geprüft werden, welche dieser Mechanismen durch das betrachtete Modell berücksichtigt und damit das Ergebnis der Wahrnehmung zuverlässig vorhergesagt wird.

Basierend auf den Ergebnissen aus den psychophysischen Messungen der Versuchspersonen und den berechneten Vorhersagen des ODOG-Modells werden folgende Fragestellungen untersucht:

Helligkeit der Testfelder

- Wie stark variiert die von den Versuchspersonen gewählte Helligkeit?
- Wie intensiv nehmen die Versuchspersonen die Helligkeit der Testfelder im Mittel wahr?
- Für welche Stimuli ist die von den Versuchspersonen wahrgenommene Helligkeit vergleichbar? Für welche nicht?
- Welchen Einfluss hat die unterschiedliche Testfeldgröße bei vergleichbaren Stimuli auf die Helligkeitswahrnehmung der Versuchspersonen? Welchen Einfluss haben andere Anpassungen der Stimuli auf diese Wahrnehmung?

Helligkeitsillusionen in den Stimuli

- Sehen alle Versuchspersonen die Illusionen innerhalb der Stimuli gleich oder unterscheidet sich das Urteil der Versuchspersonen, welches Testfeld heller und welches dunkler erscheint (Richtung der Illusion)?

- Wie intensiv nehmen die Versuchspersonen die Illusionen innerhalb der Stimuli wahr?
- Wie stark variiert die Wahrnehmung der Versuchspersonen hinsichtlich der Richtungen und der Intensitäten der Illusionen innerhalb der Stimuli?
- Gibt es Paare von Stimuli, für die die von den Versuchspersonen wahrgenommene Intensität der Helligkeitsunterschiede stark korreliert? Wie stark ist die Korrelation?

Vergleich der ODOG-Modellvorhersage mit der Wahrnehmung der Versuchspersonen

- Welche Vorhersagen trifft das ODOG-Modell für die Helligkeit der Testfelder und die Illusionen in den Stimuli?
- Stimmen die mit dem ODOG-Modell berechneten Vorhersagen für die Helligkeiten der Testfelder mit der Wahrnehmung der Versuchspersonen überein?
- Für welche Stimuli sagt das ODOG-Modell die Richtung der Illusion korrekt vorher, für welche nicht?
- Wie präzise ist die Modellvorhersage hinsichtlich der Intensität der Illusionen in den Stimuli?

2 Methode

Die Daten wurden in zwei Schritten generiert: Im ersten Schritt wurde die Helligkeitswahrnehmung von Versuchspersonen für die ausgewählten Versuchsreize im Experiment bestimmt. Im zweiten Schritt wurde für dieselben Versuchsreize berechnet, welche wahrgenommenen Helligkeitswerte das ODOG-Modell vorhersagt.

2.1 Stimuli und Versuchsaufbau

Bei den Versuchsreizen handelte es sich um zehn Stimuli, die aus schwarzen und weißen Flächen bestanden und jeweils zwei graue Testfelder enthielten. Diese Stimuli wurden auf einem grauen Hintergrund präsentiert. Das Erstellen der Stimuli wie auch die Software, die den Versuchsablauf und die Datenspeicherung steuerte, basierten auf Quellcode, der am Fachgebiet Computational Psychology entwickelt wurde. Für das Berechnen der Modellvorhersagen wurde die Python-Bibliothek multyscale verwendet, die ebenso am Fachgebiet entstand.⁶

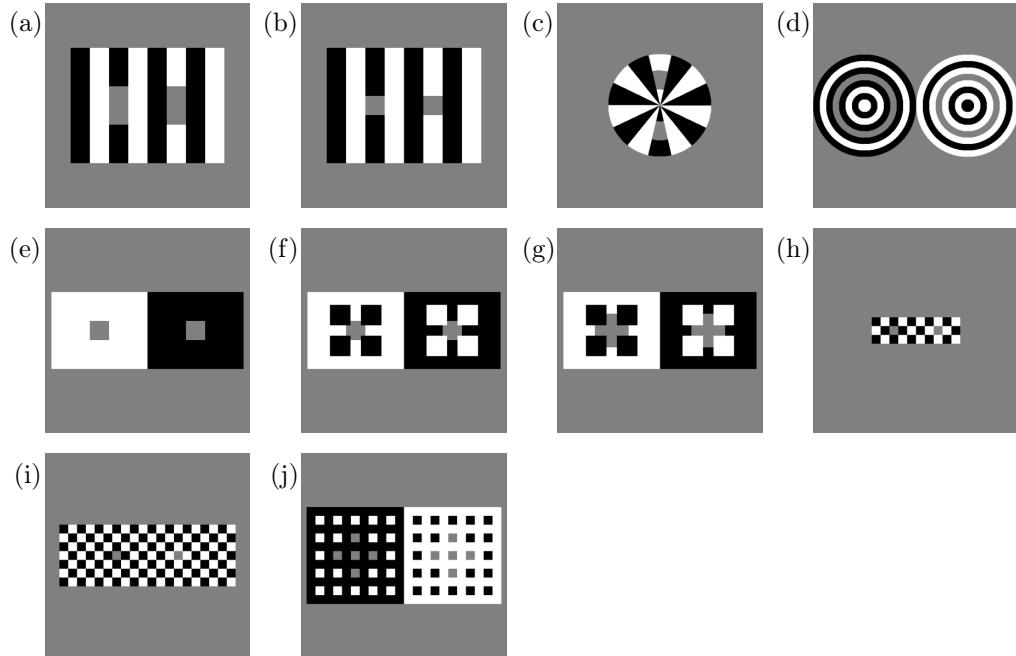


Abbildung 6: Die Stimuli für das Experiment: (a) White-groß, (b) White-klein, (c) White-Sektoren, (d) White-konzentrisch, (e) Simultaner Helligkeitskontrast, (f) Todorovic-klein, (g) Todorovic-groß, (h) Schachbrett-klein, (i) Schachbrett-groß, (j) Dungeon-Illusion

2.1.1 Auswahl der untersuchten Stimuli

Die Auswahl der Stimuli wurde möglichst umfassend gestaltet, um verschiedene Effekte zu untersuchen: Einen Teil dieser Auswahl bildeten Stimuli, die sich in ihrem Aufbau unterscheiden und bei denen unterschiedliche Effektrichtungen erwartet wurden (White-Stimuli, Simultaner Helligkeitskontrast, Dungeon-Illusion). Um die Effektrichtungen und -intensitäten

6. <https://github.com/computational-psychology>

zu vergleichen, wurden diese Stimuli teilweise um solche ergänzt, die sich im Aufbau ähneln, sodass ein paarweiser Vergleich möglich wurde (White-groß und -klein, Todorovic-groß und -klein, Schachbrett-groß und -klein). Dabei musste ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer möglichst repräsentativen Auswahl und einem vertretbaren Aufwand für das Experiment. Geplant war, das Experiment mit mindestens 25 Versuchspersonen durchzuführen. Diese sollten das Experiment in einer Sitzung vollständig absolvieren können, ohne dabei überlastet zu werden. Damit sollte erreicht werden, dass die Wahrnehmungen der Versuchspersonen über den gesamten Versuch hinweg vergleichbar blieb.

Die untersuchten Stimuli sind in Abbildung 6 dargestellt.⁷ Die Stimuli (a)–(i) entsprechen mit Ausnahme des Stimulus White-klein den von Robinson et al. (2007) verwendeten, wurden aber teilweise in ihrer Gesamtgröße oder in der Größe der Testfelder angepasst. Der Stimulus (j) wurde von Domijan (2015) übernommen. Der Stimulus White-klein ist eine eigens angepasste Variante des Stimulus White-groß.

2.1.2 Effekte in den Stimuli

Wie im Abschnitt 1.1.2 erläutert, erscheinen bei der White-Illusion die grauen Testfelder innerhalb der schwarzen Balken heller als die Testfelder desselben Grautons innerhalb der weißen Balken. Beim Stimulus White-groß wirkt das linke Testfeld auf dem schwarzen Balken deshalb heller als das rechte, welches sich auf einem weißen Balken befindet. Blakeslee und McCourt (1999) beschreiben, dass der Effekt der White-Täuschung unabhängig vom Seitenverhältnis der grauen Testfelder auftrete. So habe die Länge der angrenzenden vertikalen Flächen keinen Einfluss auf die Effektrichtung. Deshalb wird auch für den Stimulus White-klein erwartet, dass das linke Testfeld heller erscheint als das rechte.

Beim Stimulus White-Sektoren wirkt das untere Testfeld innerhalb des schwarzen Sektors heller als das obere innerhalb des weißen Sektors. Beim Stimulus White-konzentrisch wirkt der rechte Ring, der von weißen Flächen begrenzt wird, heller als der linke Ring, der von schwarzen Flächen umgeben ist (Robinson et al. 2007).

Beim Stimulus Simultaner Helligkeitskontrast erscheint Blakeslee und McCourt (1999) zufolge das rechte Testfeld auf dem schwarzen Hintergrund heller als das linke Testfeld im selben Grauton, das sich auf einem weißen Hintergrund befindet. Dieser Effekt wurde bereits im Abschnitt 1.1.2 betrachtet.

Bei den Todorovic-Stimuli ist jeweils ein quadratisches Testfeld auf einem weißen und auf einem schwarzen Hintergrund platziert. Die linken Testfelder auf dem weißen Hintergrund werden von vier schwarzen Quadranten überlagert, die rechten Testfelder auf dem schwarzen Hintergrund von weißen Quadranten. Bei dem Stimulus Todorovic-klein haben die schwarzen und weißen Quadrate, die die Testfelder überlappen, annähernd die gleiche Kontaktfläche mit den Testfeldern wie die Testfelder mit dem Hintergrund. Bei dem Stimulus Todorovic-groß ist der Anteil angrenzender Flächen der überlappenden Quadrate größer als der des Hintergrunds. Bei beiden Todorovic-Stimuli wirkt das rechte Testfeld auf dem schwarzen Hintergrund mit den überlappenden weißen Quadranten heller als das linke Testfeld auf dem weißen Hintergrund, das von schwarzen Quadranten überlappt wird (Blakeslee und McCourt 1999; Robinson et al. 2007).

Bei beiden Schachbrett-Stimuli erscheinen die rechten Testfelder, die horizontal und vertikal an weiße Flächen angrenzen, Robinson et al. 2007 folgend heller als die linken Testfelder, die an schwarze Flächen angrenzen.

Beim Stimulus Dungeon-Illusion erscheinen die fünf rechten Testfelder, die vollständig von weißen Flächen umgeben sind, heller als die fünf Testfelder auf der linken Seite, die an schwarze Flächen angrenzen (Domijan 2015).

7. Der Quellcode für das Erstellen der Stimuli ist unter https://git.tu-berlin.de/bindermann/bsc_brightness_illusions/-/blob/main/2_stimuli.ipynb abrufbar.

2.1.3 Erzeugen und Anpassen der Stimuli

Zunächst wurden testweise einige der von Robinson et al. (2007) genutzten und für das Experiment vorgesehenen Stimuli mit Hilfe des stimuli-Paketes⁸ in der Originalgröße mit 1024 Pixel (px) Breite erzeugt und zu Testzwecken auf dem Labormonitor dargestellt. Dabei wurden zwei Probleme festgestellt: Zum einen ließ die Monitorhöhe von 768 Pixel bei einer Darstellung der Stimuli White-Sektoren und White-konzentrisch in 100 Prozent Größe keine Platzierung des Schachbrettmusters mit dem Vergleichsfeld zu, ohne dass dieses zumindest teilweise durch den Stimulus überdeckt worden wäre. Zum anderen erschienen die Effekte in den Stimuli schwächer als in vorhergehenden Veröffentlichungen beschrieben, ohne dass dieser subjektive Eindruck jedoch durch ein psychophysisches Experiment näher untersucht wurde. Um einen Vergleich mit den Ergebnissen früherer Veröffentlichungen dennoch nicht von vornherein auszuschließen, sollten die Stimuli lediglich unter Erhalt der Proportionen zwischen den einzelnen Flächen verkleinert werden. Deshalb wurden die gewählten Stimuli zunächst auf die Hälfte der ursprünglichen Größe verkleinert und anschließend teilweise angepasst.

Ausgangspunkt für die Größenanpassung war der Stimulus Todorovic-klein, da bei diesem die Anpassung als am aufwendigsten eingeschätzt wurde und deshalb vermieden werden sollte. Dieser Stimulus wurde deshalb auf die Hälfte der ursprünglichen Größe verkleinert, darüber hinaus aber nicht weiter verändert.⁹ Bei dem Stimulus Simultaner Helligkeitskontrast wurden die Testfelder so angepasst, dass deren Größe den Abmessungen der Testfelder beim Stimulus Todorovic-klein entsprach. Die Höhe der Testfelder des Stimulus White-Sektoren wurde so gewählt, dass diese mit der Höhe der Testfelder beim Stimulus Todorovic-klein vergleichbar war. Die Stimuli White-groß und White-klein wurden unter Beibehaltung aller Proportionen so vergrößert, dass deren Testfeldbreite der Testfeldbreite der Stimuli Todorovic-klein sowie Simultaner Helligkeitskontrast entsprach. Bei dem Stimulus Dungeon-Illusion wurde es ebenso als komplexer eingeschätzt, die Größe zu verändern. Aus diesem Grund wurde dieser Stimulus ebenso lediglich unter Erhalt aller Proportionen auf die Hälfte der ursprünglichen Größe verkleinert. Die Stimuli Schachbrett-klein und Schachbrett-groß wurden insgesamt so skaliert, dass die Testfelder dieselbe Größe wie die einzelnen Testfelder im Stimulus Dungeon-Illusion haben. Die Stimuli Todorovic-groß und White-konzentrisch wurden unter Beibehaltung aller Proportionen lediglich auf die Hälfte der ursprünglichen Größe verkleinert.

Die so erzeugten Stimuli hatten inklusive grauem Hintergrund eine Größe von 512×512 px und wurden als PNG-Datei gespeichert. Die Abmessungen der Testfelder sind in Tabelle 1 enthalten.

8. <https://github.com/computational-psychology/stimuli>

9. Blakeslee und McCourt (1999) beschreiben den Stimulus Todorovic-klein so, dass die schwarzen und weißen Quadrate, die die grauen Testfelder überlappen, jeweils die gleichen Kontaktflächen wie der Hintergrund haben. Demnach soll der Anteil angrenzender schwarzer und weißer Flächen gleich sein. Tatsächlich haben sich bei genauerer Betrachtung in dem im Experiment verwendeten Stimulus leichte Unterschiede bei diesen Anteilen gezeigt. Während die geraden Seitenflächen, also die oben, unten, links und rechts angrenzenden, in der final verwendeten Stimulus-Größe jeweils eine Länge von 26 px haben und sich somit auf 104 px summieren, beträgt die Seitenlänge der Kontaktflächen der in den Ecken insgesamt vier überlappenden Quadrate jeweils 22 px, also 88 px in der Summe. Diese Abweichung besteht bereits im Original-Stimulus, wie er im stimuli-Paket Version 0.8 enthalten ist.

2.1.4 Berechnen der Eingabewerte für die Luminanz

Anschließend wurde die Luminanz der Stimuli angepasst. Dabei wurden die gleichen wie von Blakeslee und McCourt (1999) verwendeten Luminanzwerte für die Stimuli gewählt: Deren mittlerer Wert lag bei $50 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Die grauen Testfelder und der Hintergrund hatten also eine Luminanz von $50 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Die Luminanzabstände zu den schwarzen und weißen Flächen waren jeweils gleich und betrugen ebenso $50 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$, sodass die weißen Flächen eine Luminanz von $0 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ und die schwarzen von $100 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ hatten.

Der für das Experiment genutzte Quellcode basiert auf einer Vorlage¹⁰, die bereits von Aguilar und Maertens (2020) genutzt wurde. In dieser Vorlage wird die Bibliothek HRL¹¹ (High Resolution Luminance) unter anderem genutzt, um die Stimuli mit den korrekten Ziel-Luminanzen darzustellen und die von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten zu erfassen. Die HRL-Bibliothek verarbeitet alle Helligkeitswerte im Intervall $[0, 1]$. Im Folgenden werden deshalb die Ein- und Ausgabewerte des Experimentes, die HRL-seitig in das Intervall $[0, 1]$ umgerechnet wurden, als HRL-Wert bezeichnet.

Grundlage für das Berechnen der Eingabe-Luminanzwerte für die Stimuli sowie das Umrechnen der durch die Versuchspersonen gewählten Helligkeitswerte war eine sogenannte Lookup-Tabelle. Diese Tabelle basierte auf einer Photometer-Messung mithilfe eines HRL-Skriptes und enthielt für 238 HRL-Eingangswerte im Intervall $[0, 1]$ die dadurch am Bildschirm erzeugten Luminanzen in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$.¹² Demnach betrug der höchste durch den Monitor darstellbare Luminanzwert $457.97 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$, was als Eingangssignal einem HRL-Wert von ≈ 0.989 entsprach.

Die Stimuli wurden als 8-Bit-Graustufenbilder im PNG-Format erzeugt. Damit kann jeder Bildpunkt dieser PNG-Bilder einen Helligkeitswert zwischen 0 und $2^8 - 1 = 255$ annehmen. Den Einträgen der Lookup-Tabelle zufolge würde ein Eingabewert von 255 also am Bildschirm eine Luminanz von $457.97 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ erzeugen.

Mithilfe linearer Regression wurden auf Basis der Tabelle die für die PNG-Bilddateien notwendigen Eingabewerte im Intervall $[0, 255]$ für die Ziel-Luminanzwerte von 0, 50 und $100 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ ermittelt. Da dabei für die Luminanz von $0 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ ein rechnerischer Eingabewert von -0.31 berechnet wurde, wurde der 8-Bit-Eingabewert auf 0 aufgerundet. Für $50 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ wurde ein 8-Bit-Eingabewert von 27.27 und für $100 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ von 54.85 ermittelt.

2.1.5 Berechnen des Sehwinkels

Der Sehwinkel θ berechnet sich nach der Formel

$$\tan \theta = \frac{h}{d}, \quad (1)$$

wobei h die Länge des Objektes ist und d der Abstand des Objektes zum Auge (Bruce et al. 2003).

Der Computerbildschirm hatte einen sichtbaren Bildbereich von 40 cm in der Breite und 30 cm in der Höhe. Die Versuchspersonen saßen mit einem Abstand von 69.75 cm vor dem Monitor. Darauf konnten 1024 Pixel in der Breite und 768 Pixel in der Höhe dargestellt werden. Das entspricht einem Sehwinkel von $32^\circ \times 24.3^\circ$. Ein Pixel misst demnach $0.031^\circ \times 0.031^\circ$. Basierend auf dem Abstand zwischen den Augen der Versuchspersonen und dem Monitor ergeben sich die in Tabelle 1 enthaltenen Maße der Testfelder.

10. https://github.com/computational-psychology/template_experiment

11. <https://github.com/computational-psychology/hrl>

12. Die Messung wurde von Dr. Guillermo Aguilar vor Beginn des Experimentes durchgeführt.

Tabelle 1: Maße der Testfelder in den Stimuli

Abb. 6	Stimulus	Maße der Testfelder	
		Breite × Höhe (in px)	Breite × Höhe
(a)	White-groß	48 × 96	1.49° × 2.98°
(b)	White-klein	48 × 48	1.49° × 1.49°
(c)	White-Sektoren	Höhe 48	Höhe 1.49°
(d)	White-konzentrisch	Breite Ring 16	Breite Ring 0.5°
(e)	Sim. Helligkeitskontrast	48 × 48	1.49° × 1.49°
(f)	Todorovic-klein	48 × 48	1.49° × 1.49°
(g)	Todorovic-groß	85 × 85	2.63° × 2.63°
(h)	Schachbrett-klein	22 × 22	0.68° × 0.68°
(i)	Schachbrett-groß	22 × 22	0.68° × 0.68°
(j)	Dungeon-Illusion	(5×) 22 × 22	(5×) 0.68° × 0.68°

2.1.6 Versuchsaufbau

Bei dem Laborexperiment wurden den Versuchspersonen die Stimuli auf einem Computerbildschirm präsentiert. Bei diesem Computerbildschirm handelte es sich um einen Siemens SMM 21106 LS. Dessen Videoeingangssignal wurde mithilfe eines DATAPixx Video I/O Hub¹³ gesteuert.

**Abbildung 7:** Das Eingabegerät RESPONSEPiXX Handheld¹⁴

Die Versuchspersonen befanden sich während des Experiments in einem abgetrennten Teil des Raumes ohne künstliche Lichtquelle. Dieser Teil des Raumes war mit einem lichtundurchlässigen, deckenhohen Vorhang so abgedunkelt, dass kein Tageslicht einfiel. Die Versuchspersonen saßen in dem festgelegten Abstand mit dem Kopf in einer Kinnstütze. Vor den Versuchspersonen befand sich das in Abbildung 7 dargestellte Eingabegerät RESPONSEPiXX HANDHELD mit fünf Tasten.

13. <https://vpixx.com/products/datapixx/>, abgerufen am 28. Oktober 2021.

14. <https://vpixx.com/products/handheld/>, abgerufen am 22. September 2021.

2.2 Versuchsablauf

Die Stimuli wurden den Versuchspersonen wie in Abbildung 8 dargestellt präsentiert. Oberhalb der Stimuli befand sich jeweils das quadratische Vergleichsfeld. Dieses Vergleichsfeld war umgeben von einer Fläche mit insgesamt 24 kleineren Quadranten. Deren Anordnung wurde jeweils mit der Präsentation eines neuen Stimulus durch eine Rotation der gesamten Fläche um einen zufällig gewählten Wert von 90° , 180° oder 270° geändert. Die Luminanzwerte der Quadrate innerhalb dieser Fläche waren so gewählt, dass deren niedrigster Wert dem niedrigsten Luminanzwert der Stimuli ($0 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$) und deren höchster Wert dem höchsten Luminanzwert der Stimuli ($100 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$) entsprach. Die Anordnung der 24 einzelnen Quadrate wurde aus der am Fachgebiet vorhandenen Vorlage¹⁵ übernommen, lediglich deren Luminanz wurde unter Beibehalten der Abstände angepasst. Für das Umrechnen der jeweiligen Eingabewerte für die Stimuli und die umgebenden Quadrate wurde auf die Werte der Lookup-Tabelle zurückgegriffen, die für die gewünschte Ziel-Luminanz jeweils den Eingabewert enthielt.

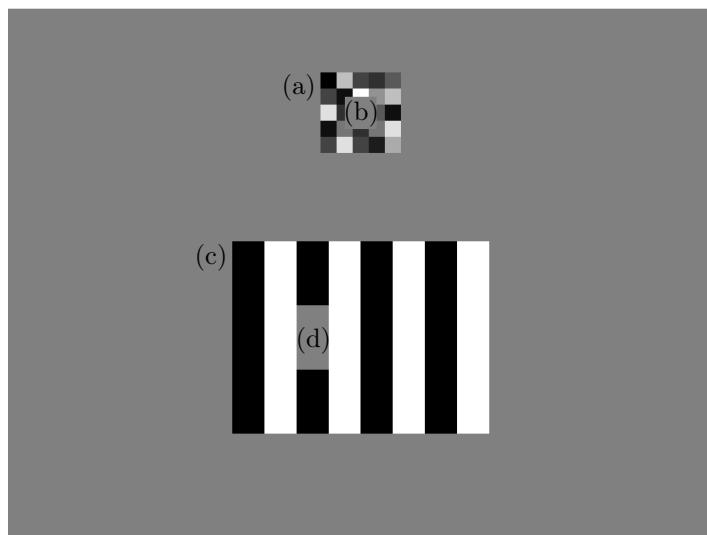


Abbildung 8: Die Bildschirmsicht während des Experiments: Oben das Schachbrettmuster (a) mit dem Vergleichsfeld (b), unten der Stimulus (c) mit dem Testfeld (d)

Den Versuchspersonen wurden die Stimuli so präsentiert, dass diese jeweils nur ein graues Testfeld enthielten. Dadurch sollte erreicht werden, dass die Versuchspersonen ohne eine zusätzliche Markierung oder gesonderte Anweisung wussten, von welchem Testfeld sie die Helligkeit bewerten sollten. Zudem sollte damit vermieden werden, dass die Versuchspersonen während der Bewertung des Testfeldes dessen Helligkeit zumindest unbewusst mit der des anderen Testfeldes vergleichen und dieser Vergleich die Helligkeitswahrnehmung für das gewählte Testfeld beeinflusst.

Die Versuchsreize wurden allen Versuchspersonen in der Reihenfolge wie in Abbildung 9 dargestellt präsentiert. Diese Reihenfolge wurde bei jeder Versuchsperson drei Mal wiederholt. Die Reihenfolge, in der die Versuchsreize präsentiert wurden, war zufällig gewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass niemals dieselben Versuchsreize oder Versuchsreize, die sich in ihrer Form ähneln, hintereinander präsentiert wurden. Damit sollte erreicht werden, dass das Urteil der Versuchspersonen zu einem Versuchsreiz so stark wie möglich unbeeinflusst vom zuvor gesehenen Versuchsreiz war.

15. https://github.com/computational-psychology/template_experiment

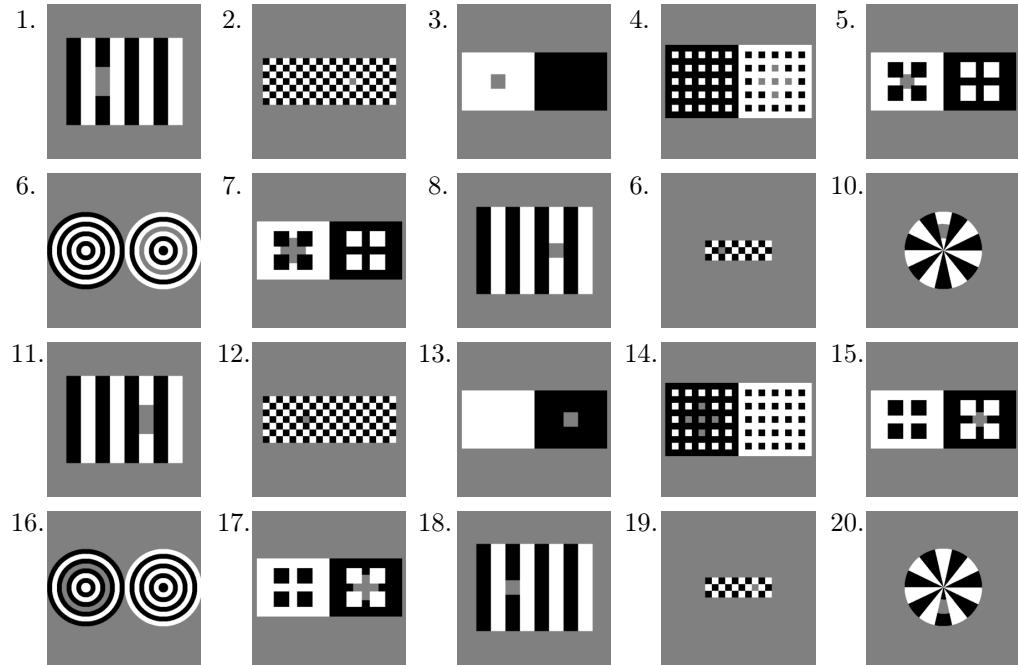


Abbildung 9: Die Reihenfolge, in der die Versuchsreize den Versuchspersonen im Experiment präsentiert wurden. Diese Reihenfolge wurde drei Mal wiederholt.

Zu Beginn des Experimentes wurde den Versuchspersonen die Aufgabenstellung und die Steuerung mit dem Tasten-Eingabegerät erläutert. Die Aufgabe der Versuchspersonen war es, mithilfe des Tasten-Controllers die Helligkeit des Vergleichsfeldes so einzustellen, dass diese mit der Helligkeit des Testfeldes im präsentierten Stimulus nach der Wahrnehmung der Versuchsperson übereinstimmt. Mit den Tasten nach-oben und nach-unten konnten die Versuchspersonen die Helligkeit des Vergleichsfeldes in großen Schritten erhöhen beziehungsweise verringern, mit den Tasten nach-links und nach-rechts in kleinen Schritten. Die Versuchspersonen erfuhren darüber hinaus aber nicht, wie viele kleine Schritte einem großen Schritt entsprachen oder in welcher Skalierung die Helligkeit des Vergleichsfeldes beim Tastendruck erhöht oder verringert wurde. Einzig wenn die Versuchspersonen die minimale oder maximale Helligkeit des Vergleichsfeldes erreicht hatten, erschien ein Warnhinweis, den die Versuchspersonen mit der mittleren Taste bestätigen mussten, um das Experiment fortzusetzen. Nachdem die Versuchspersonen nach ihrer Wahrnehmung den Punkt gefunden hatten, an dem die Helligkeit des Vergleichsfeldes mit der des Testfeldes übereinstimmte, drückten sie die mittlere Taste zur Bestätigung und der gewählte Helligkeitswert wurde gespeichert. Anschließend wurde der nächste Stimulus präsentiert. Die anfänglich eingestellte Helligkeit des Vergleichsfeldes wurde mit der Anzeige eines neuen Stimulus jeweils auf einen neuen Startwert gesetzt, der zufällig gewählt war.

Das Experiment wurde von den Versuchspersonen in einer Sitzung absolviert. Es gab dabei keine Zeitbegrenzung. Falls eine Versuchsperson versehentlich die mittlere Taste des Eingabegerätes gedrückt hatte, also ungewollt einen Helligkeitswert gewählt hatte, wurde dieser Wert gelöscht und der Stimulus anschließend erneut präsentiert.

Die Daten aller Versuche sind im Experiment-Repository¹⁶ abrufbar.

16. <https://git.tu-berlin.de/bindermann/experiment/-/tree/main/results>

2.3 Berechnen der ODOG-Modellvorhersage

Anschließend wurden für alle Stimuli die Vorhersagen des ODOG-Modells zur wahrgenommenen Helligkeit der Testfelder berechnet.¹⁷ Dazu wurden die Stimuli mit denselben Funktionen wie für das Laborexperiment erzeugt. Die Stimuli wurden bei dem Laborexperiment auf einem Monitor präsentiert, der insgesamt 768×1024 Bildpunkte darstellen konnte. Deshalb wurden dem grauen Hintergrund der Stimuli als Eingabebild für die Modellvorhersage graue Bildpunkte hinzugefügt, sodass deren Gesamtgröße mit der im Experiment präsentierten Größe übereinstimmte. Die Position der Stimuli entsprach dabei genau der Position dieser Flächen bei der Anzeige auf dem Monitor im Laborexperiment.

Wie in Gleichung (1) berechnet hatte der Monitor und damit der Eingabestimulus eine visuelle Ausdehnung von $32^\circ \times 24.3^\circ$. Dies entsprach vom Mittelpunkt des Eingabebildes aus gerechnet einer horizontalen Ausdehnung von -16° bis 16° und einer vertikalen von -12.15° bis 12.15° . Diese Werte wurden der ODOG-Funktion als Parameter übergeben. Das Ergebnis der Berechnung war für jeden Stimulus ein Array, wobei jedes Feld genau einen Bildpunkt des Eingabebildes repräsentierte. Jedes Feld enthielt als numerischen Wert die durch das Modell vorhergesagte wahrgenommene Helligkeit dieses Bildpunktes. Diese numerischen Werte stellten die relative Abweichung der wahrgenommenen Helligkeit vom Nullwert dar, wobei dieser Nullwert den Helligkeitswert der grauen Bildpunkte repräsentierte. Um die Modellvorhersage mit den Labormessungen vergleichen zu können, wurden die Ausgabewerte der Modellberechnung in den Wertebereich im Intervall von 0 bis 100 skaliert. Dieser Wertebereich entsprach den im Laborexperiment verwendeten Luminanzwerten für die Stimuli in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$.

Um die vorhergesagte Helligkeit für die Testfelder zu berechnen, wurde das arithmetische Mittel der Werte aller Bildpunkte gebildet, die innerhalb dieser Testfelder lagen. Dieses Vorgehen folgt methodisch dem von Robinson et al. (2007). Dazu wurden die Masken verwendet, die das stimuli-Paket für jeden Stimulus bereitstellt. Diese Masken wurden ebenso durch ein Array repräsentiert. Dieses Array enthielt an den Positionen der Bildpunkte der Testfelder die Werte 1 (linkes/oberes Testfeld) oder 2 (rechtes/unteres Testfeld). Alle anderen Werte waren 0. Dadurch konnten die Stimuli mit den jeweiligen Masken multipliziert werden, sodass nur Felder, die Bildpunkte innerhalb der Testfelder repräsentierten, Werte ungleich 0 enthielten. Im Ergebnis der Multiplikation blieben die Werte innerhalb der Testfelder unverändert. Alle anderen Felder enthielten infolge der Multiplikation mit 0 den Wert 0. So konnten anschließend durch eine bedingte Listenoperation alle Werte des Teil-Arrays mit dem Testfeld ausgewählt werden, die ungleich 0 waren. Das daraus ermittelte arithmetische Mittel ist die ODOG-Modellvorhersage für die wahrgenommene Helligkeit des jeweiligen Testfeldes.

2.4 Datenschutz und Ethik

An dem Laborexperiment nahmen zwischen Oktober 2021 und Januar 2022 insgesamt 27 Versuchspersonen teil. Dabei handelte es sich um Angehörige des Fachgebietes Computational Psychology, Studentinnen und Studenten der Technischen Universität Berlin, Menschen aus dem persönlichen Umfeld des Autors sowie den Autor selbst. Die Versuchspersonen sollten nach eigenem Bekunden über normale Sehfähigkeiten verfügen und keine unkorrigierte Fehlsichtigkeit haben. Die Teilnahme an dem Laborexperiment war für die Versuchspersonen freiwillig, auf Wunsch erhielten sie eine Aufwandsentschädigung in der üblichen Höhe. Vor ihrer Teilnahme wurden die Versuchspersonen über den Ablauf informiert, sie mussten eine Einwilligungserklärung unterzeichnen und die darin enthaltenen Datenschutzhinweise zur Kenntnis nehmen.¹⁸

17. Der Quellcode für die Berechnungen ist unter https://git.tu-berlin.de/bindermann/bsc_brightness_illusions/-/blob/main/3_odog_vorhersage.ipynb abrufbar.

18. Der verwendete Vordruck ist im Anhang A.2 enthalten.

Der Umgang mit personenbezogenen Daten im Rahmen dieser Arbeit erfolgte unter Beachtung aller einschlägigen Regelungen der EU-Datenschutzgrundverordnung und des Bundesdatenschutzgesetzes. Zudem wurde die Ethikkommission der Fakultät IV vor der ersten Ansprache der Versuchspersonen im Rahmen der fakultätsinternen Regelungen beteiligt und eine Selbstevaluation erfolgreich durchgeführt.¹⁹ Darüber hinaus wurden bei den psychophysischen Messungen alle Grundsätze der Erklärung von Helsinki eingehalten.²⁰

19. Die Bescheinigung ist im Anhang A.3 enthalten.

20. https://www.bundesaerztekammer.de/fileadmin/user_upload/downloads/pdf-Ordner/International/Deklaration_von_Helsinki_2013_20190905.pdf, abgerufen am 10. Juni 2021.

3 Ergebnisse

Die 27 Versuchspersonen, die an dem Experiment teilnahmen, bewerteten die von ihnen wahrgenommene Helligkeit für insgesamt zehn Stimuli. Jeder dieser Stimuli enthielt zwei Testfelder, von denen den Versuchspersonen jeweils einer präsentiert wurde. Jedes Testfeld wurde den Versuchspersonen drei Mal präsentiert. Für jedes einzelne Testfeld wurden demnach $27 \cdot 3 = 81$ Werte für die von den Versuchspersonen wahrgenommene Helligkeit erhoben. Im Ergebnis des Experiments wurden insgesamt also $20 \cdot 81 = 1620$ Einzelwerte für die wahrgenommene Helligkeit erhoben, die im Folgenden ausgewertet werden.²¹

3.1 Experimentelle Ergebnisse

3.1.1 Streuung der gewählten Helligkeiten für die Testfelder

In der Abbildung 10 sind von den Versuchspersonen im Laborexperiment gewählten Helligkeitswerte für jedes einzelne Testfeld visualisiert.²²

Damit kann zunächst ein erster Überblick über die Ergebnisse der psychophysischen Messungen erlangt werden. Darin sind beispielsweise die Spannweite sowie die Streuung der von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten erkennbar. Bei der Spannweite handelt es sich um die Differenz zwischen dem höchsten Wert der von allen Versuchspersonen im Mittel gewählten Helligkeit für ein Testfeld eines Stimulus und der niedrigsten im Mittel gewählten Helligkeit für dasselbe Testfeld (Krickhahn 2017).

Am geringsten ist die Spannweite für das obere Testfeld des Stimulus White-Sektoren sowie für beide Testfelder des Stimulus White-groß. Am höchsten ist die Spannweite für die rechten Testfelder der Stimuli White-konzentrisch und Dungeon-Illusion.

Die über den Einzelwerten dargestellten Boxplots ermöglichen eine genauere Betrachtung, wie diese Werte streuen. Dazu fokussieren wir uns auf den interquartilen Abstand. Dieser gibt für jedes Testfeld die Differenz zwischen den Werten im dritten Quartil und denen im ersten Quartil an. Im dritten Quartil befinden sich dabei diejenigen 75 Prozent aller Werte, die einen solchen oder geringeren Wert haben. Im ersten Quartil befinden sich diejenigen 25 Prozent aller Werte, die höchstens diesen Wert oder einen geringeren haben. Der interquartile Abstand gibt also an, in welchem Wertebereich sich die mittleren 50 Prozent aller Werte befinden. Damit ermöglicht der interquartile Abstand eine von Extremwerten und Ausreißern²³ unabhängige Betrachtung der Streuung der von den Versuchspersonen im Mittel für jedes Testfeld gewählten Helligkeiten (Krickhahn 2017).

So haben die gewählten Helligkeiten für beide Testfelder der Stimuli White-groß, Todorovic-klein und Todorovic-groß, das linke Testfeld des Stimulus White-klein sowie das obere Testfeld des Stimulus White-Sektoren die geringsten interquartilen Abstände. Die von den Versuchspersonen im Mittel gewählten Helligkeitswerte streuen für diese Testfelder also am geringsten. Das spricht dafür, dass viele Versuchspersonen die Helligkeit dieser Testfelder ähnlich wahrnahmen.

Die höchsten interquartilen Abstände für die von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten entfallen auf die rechten Testfelder der Stimuli White-klein, White-konzentrisch und Schachbrett-klein, auf das untere Testfeld des Stimulus White-Sektoren sowie beide Testfelder des Stimulus Dungeon-Illusion. Diese hohe Streuung ist ein Anzeichen dafür, dass die Versuchspersonen die Helligkeit dieser Testfelder eher unterschiedlich wahrnahmen.

21. Alle Einzelwerte sind im Anhang A.1 enthalten.

22. Der Quellcode für alle Visualisierungen und Berechnungen im Abschnitt 3.1 (Experimentelle Ergebnisse) ist unter https://git.tu-berlin.de/bindermann/bsc_brightness_illusions/-/blob/main/4_experimentelle-ergebnisse.ipynb abrufbar.

23. Als Ausreißer werden Werte bezeichnet, die entweder als Ergebnis nicht erwartet werden oder technisch unmöglich sind und somit auf einen Fehler hindeuten können (Krickhahn 2017). Die Ergebnisse der psychophysischen Messungen enthalten als Minimalwert $27 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ und als Maximalwert $76 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Diese Werte sind weder technisch unmöglich noch wären sie für den Autor bei dem Experiment nicht erwartbar gewesen. Aus diesem Grund werden die außerhalb der Antennen (Whiskers) liegenden Werte als Extremwerte angesehen.

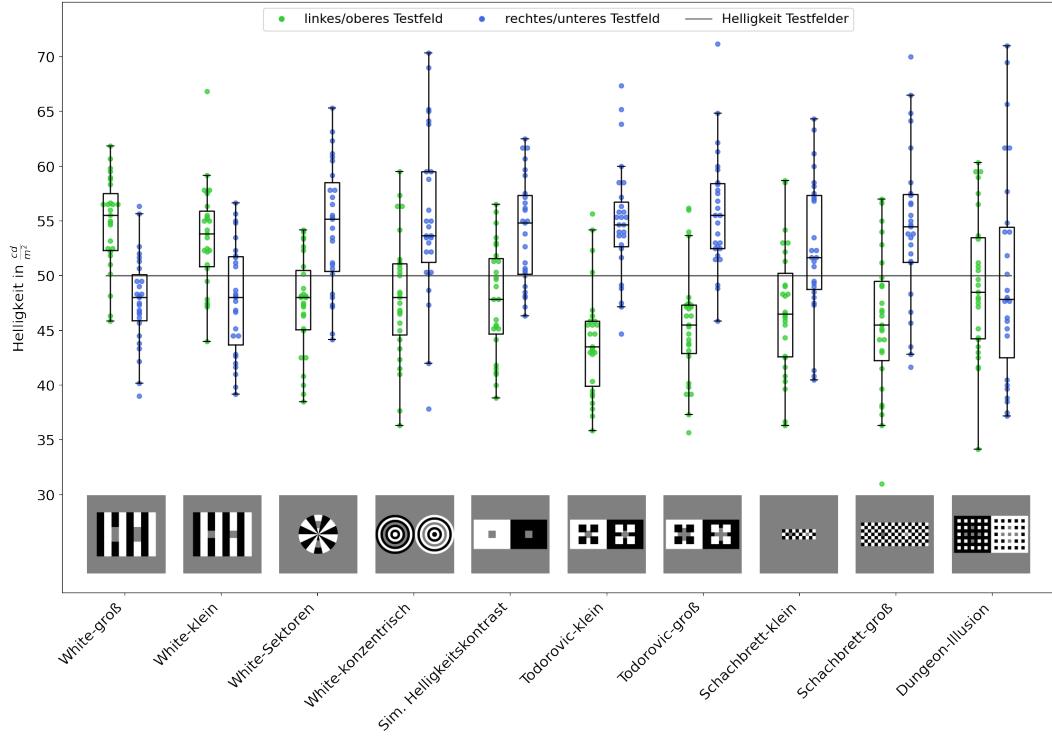


Abbildung 10: Die von den Versuchspersonen im Laborexperiment gewählten Helligkeitswerte: Jeder Punkt repräsentiert das arithmetische Mittel der von einer Versuchsperson für ein Testfeld gewählten Helligkeiten über alle drei Durchgänge. Die grünen Punkte stellen die Werte der linken Testfelder dar, im Falle des Stimulus White-Sektoren des oberen Testfeldes. Die blauen Punkte stellen die Werte für die rechten Testfelder oder das untere Testfeld (Stimulus White-Sektoren) dar. Die horizontalen Linien in den Boxplots zeigen die Lage des Medians für die Werte des jeweiligen Testfeldes, die Antennen (Whiskers) bilden jeweils maximal das 1.5-fache des interquartilen Abstands zum ersten und dritten Quartil ab. Die horizontale graue Linie stellt die tatsächliche Helligkeit der Testfelder dar, die $50 \frac{cd}{m^2}$ betrug.

Die zusätzlich in Abbildung 10 eingezeichnete horizontale graue Linie gestattet zudem eine Einschätzung, wie die Lagebeziehung zwischen der tatsächlichen Helligkeit der Testfelder und den mittleren 50 Prozent der Werte der von den Versuchspersonen gewählten Helligkeitswerte ist. So befinden sich beispielsweise die mittleren 50 Prozent der gewählten Helligkeitswerte für das jeweils linke und rechte Testfeld beider Todorovic-Stimuli sowie für den Stimulus Schachbrett-groß unterhalb (linke Testfelder) beziehungsweise oberhalb (rechte Testfelder) des Wertes von $50 \frac{cd}{m^2}$. Auch bei den linken Testfeldern der Stimuli White-groß und White-klein sowie den rechten oder unteren Testfeldern der Stimuli White-Sektoren, White-konzentrisch und Simultaner Helligkeitskontrast liegen die mittleren 50 Prozent der gewählten Helligkeitswerte über der Schwelle der tatsächlichen Helligkeit dieser Testfelder. Diese Lagebeziehungen können so interpretiert werden, dass viele Versuchspersonen die Testfelder deutlich heller oder dunkler wahrgenommen, als die Testfelder tatsächlich waren. Beim Stimulus Dungeon-Illusion verteilen sich die mittleren 50 Prozent der wahrgenommenen Helligkeitswerte um den Wert von $50 \frac{cd}{m^2}$. Auffällig ist zudem, dass der interquartile Abstand für das rechte Testfeld dieses Stimulus den höchsten Wert unter allen Testfeldern darstellt. Diese starke Streuung der mittleren 50 Prozent der gewählten Helligkeitswerte ist auch im Boxplot deutlich sichtbar. Daraus wird gefolgert, dass die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeiten der Testfelder dieses Stimulus stark variierten.

3.1.2 Mittelwerte der gewählten Helligkeiten der Testfelder

Für den späteren Vergleich mit den ODOG-Modellvorhersagen wird im Folgenden das arithmetische Mittel der von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten für die Testfelder betrachtet. Tabelle 2 enthält die arithmetischen Mittelwerte aller von Versuchspersonen für ein Testfeld gewählten Helligkeiten in $\frac{cd}{m^2}$. Die Testfelder in allen Stimuli hatten eine Luminanz von $50 \frac{cd}{m^2}$. Werte in der Tabelle 2, die größer als 50 sind bedeuten, dass die Versuchspersonen dieses Testfeld im Mittel heller wahrgenommen haben, als es tatsächlich war. Werte, die kleiner als 50 sind bedeuten demnach, dass die Versuchspersonen dieses Testfeld im Mittel dunkler wahrgenommen haben.

Die rechte Spalte in Tabelle 2 enthält die Differenz aus dem Mittelwert der gewählten Helligkeit für das linke/obere Testfeld und das rechte/untere Testfeld des jeweiligen Stimulus. Positive Werte bedeuten dabei, dass die wahrgenommene Helligkeit für das linke/obere Testfeld höher ist, das Testfeld auf die Versuchspersonen im Mittel also heller wirkte als das rechte/untere Testfeld. Umgekehrt bedeutet ein negativer Wert, dass die Versuchspersonen im Mittel das rechte/untere Testfeld heller als das linke/obere wahrgenommen haben.

Tabelle 2: Die Mittelwerte der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeiten der Testfelder sowie die Differenzen aus den Mittelwerten für das linke/obere und das rechte/untere Testfeld des jeweiligen Stimulus

Abb. 6	Stimulus	Arithmetisches Mittel der von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten der Testfelder in $\frac{cd}{m^2}$		
		links/oben	rechts/unten	Differenz
(a)	White-groß	54.8	47.8	7.0
(b)	White-klein	53.5	47.8	5.7
(c)	White-Sektoren	47.4	54.5	-7.1
(d)	White-konzentrisch	48.1	55.3	-7.2
(e)	Sim. Helligkeitskontrast	47.8	54.1	-6.3
(f)	Todorovic-klein	44.0	54.9	-10.9
(g)	Todorovic-groß	45.5	55.8	-10.3
(h)	Schachbrett-klein	46.9	52.6	-5.7
(i)	Schachbrett-groß	45.7	54.5	-8.8
(j)	Dungeon-Illusion	49.2	49.8	-0.6

Die höchsten Werte für die von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten haben die rechten Testfelder des Stimulus White-konzentrisch und beider Todorovic-Stimuli. Diese Testfelder wurden von den Versuchspersonen also am hellsten wahrgenommen. Die niedrigsten Helligkeitswerte haben die linken Testfelder beider Schachbrett-Stimuli sowie beider Todorovic-Stimuli. Für diese Testfelder war die von den Versuchspersonen wahrgenommene Helligkeit also am geringsten. Auffällig ist, dass im arithmetischen Mittel über alle 27 Versuchspersonen die gewählten Helligkeiten für die rechten Testfelder der Stimuli White-groß und White-klein gleich sind. Das ist auch deshalb bemerkenswert, da die Testfelder im Stimulus White-groß doppelt so hoch waren wie die Testfelder im Stimulus White-klein.

3.1.3 Intensität der Helligkeitsillusionen innerhalb der Stimuli

Im Folgenden wird die Richtung und die Intensität der Helligkeitsillusionen innerhalb der Stimuli anhand der von den Versuchspersonen gewählten Helligkeitswerte für die Testfelder untersucht.

Wie im Abschnitt 1.1.2 erläutert, können Effekte wie der Simultane Helligkeitskontrast oder die White-Täuschung dazu führen, dass Personen die Helligkeit einer Fläche heller oder dunkler wahrnehmen, als diese tatsächlich ist. In den experimentellen Ergebnissen lässt sich das daran beobachten, dass Versuchspersonen für die Testfelder in einem Stimulus

jeweils unterschiedliche Helligkeitswerte wählten, obwohl beide Testfelder tatsächlich dieselbe Helligkeit hatten. Die Versuchspersonen nahmen die zwei identisch hellen Testfelder also unterschiedlich hell wahr. Es trat eine Helligkeitsillusion innerhalb dieses Stimulus auf.

Die Intensität der Illusion bemisst sich dabei aus der Differenz zwischen der von einer Versuchsperson gewählten Helligkeit für das linke/obere Testfeld und der gewählten Helligkeit für das rechte/untere Testfeld. Je größer die Differenz dieser beiden Helligkeitswerte ist, desto höher ist der wahrgenommene Helligkeitsunterschied und damit die Intensität der Illusion.

Anhand dieser Differenz lässt sich auch die Richtung der wahrgenommenen Helligkeitsillusion ablesen: Bei einem positiven Wert nahm die Versuchsperson das linke oder obere Testfeld heller wahr als das rechte oder untere Testfeld. Bei einem negativen Wert nahm die Versuchsperson dementsprechend das rechte oder untere Testfeld heller wahr als das linke oder obere.

Die wahrgenommenen Helligkeitsillusionen ($\Delta\Psi$) sind für jede Versuchsperson und jeden Stimulus in Abbildung 11 visualisiert. Jeder schwarze Punkt repräsentiert darin die von einer Versuchsperson für diesen Stimulus wahrgenommene Intensität der Illusion ($\Delta\Psi$), die sich aus der Differenz der im Mittel über alle drei Durchgänge gewählten Helligkeitswerte für das linke/obere und das rechte/untere Testfeld in einem Stimulus berechnet und in $\frac{cd}{m^2}$ angegeben ist. Die horizontale schwarze Linie markiert den Nullwert der Differenz. Liegen Werte oberhalb dieser Linie, sind diese also positiv, so wurde das linke/obere Testfeld heller wahrgenommen als das rechte/untere. Liegen die Werte hingegen unterhalb dieser Linie, wurde das rechte/untere Testfeld heller wahrgenommen als das linke/obere. Die horizontale graue Linie markiert jeweils das arithmetische Mittel der Intensität der Illusionen über alle Versuchspersonen für den jeweiligen Stimulus ($\bar{\Delta\Psi}$). Der halbtransparente rote Bereich visualisiert die Standardabweichung (σ) der Illusionsintensität als Maß für die mittlere Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert.

Anhand der Lage der horizontalen grauen Linie lässt sich ablesen, dass die von den Versuchspersonen im Mittel wahrgenommenen Illusionen den im Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Richtungen entsprachen: Bei den Stimuli White-groß und White-klein wirkten die linken Testfelder im Mittel auf die Versuchspersonen heller als die rechten Testfelder. Bei allen anderen Stimuli wirkten im Mittel die rechten/unteren Testfelder auf die Versuchspersonen heller als die linken/unteren Testfelder.

Die höchste Illusionsintensität lässt sich bei beiden Todorovic-Stimuli ablesen. Bei diesen Stimuli war der von den Versuchspersonen zwischen den Testfeldern wahrgenommene Helligkeitsunterschied am intensivsten. Bei den Stimuli White-klein und White-groß ist die Standardabweichung am geringsten. Die Versuchspersonen nahmen die Illusion in diesen Stimuli im Mittel also ähnlich intensiv wahr.

Bei den Stimuli White-konzentrisch und Dungeon-Illusion ist die Standardabweichung der Illusionsintensität am höchsten. Die Versuchspersonen nahmen die Illusion also unterschiedlich intensiv wahr. Insbesondere bei der Dungeon-Illusion kann dies auch darin begründet sein, dass die Versuchspersonen in der Richtung, wie sie die Illusion wahrnahmen, stark variierten. So nahm etwas mehr als die Hälfte aller Versuchspersonen das linke Testfeld heller als das rechte wahr, allerdings in geringerer Intensität. Das führt bei der Betrachtung der Werte aller Versuchspersonen dazu, dass im Mittel das rechte Testfeld wie in der Literatur beschrieben auf die Versuchspersonen heller wirkte als das linke. Diese Auffälligkeit zeigt sich auch in der Illusionsintensität. Diese ist beim Stimulus Dungeon-Illusion die geringste unter allen getesteten Stimuli, deren Standardabweichung ist dabei am höchsten. Die Mittelwerte und deren starke Streuung über alle Versuchspersonen lassen also einen vorsichtigen Schluss zu, welches Testfeld auf die Versuchspersonen im Mittel heller wirkte.

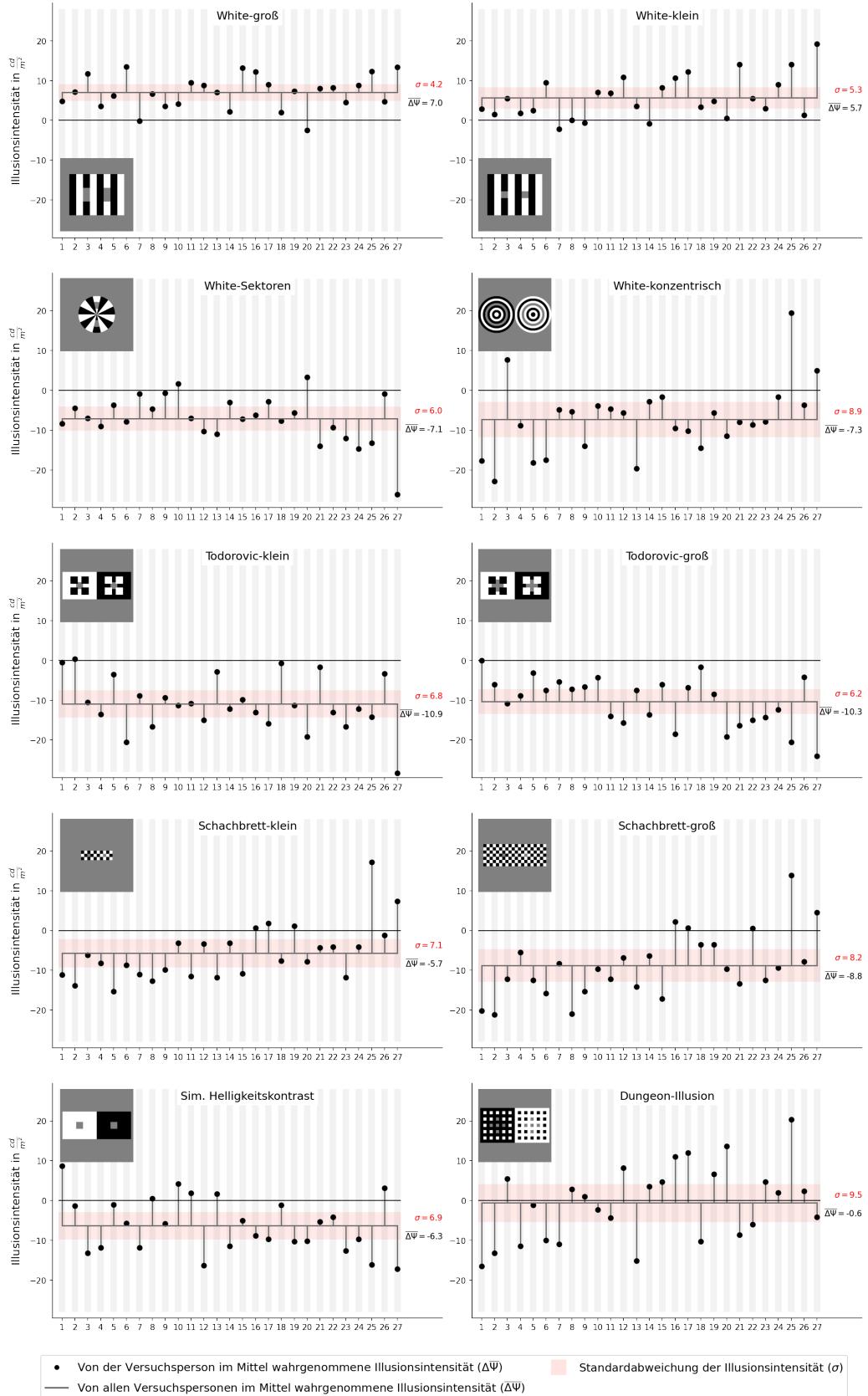


Abbildung 11: Die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionsintensitäten in den Stíimuli

3.1.4 Interpretation der experimentellen Ergebnisse

Anhand der zuvor analysierten Daten wird nun eine Interpretation der Ergebnisse aus dem Laborexperiment vorgenommen. Dazu werden die Stimuli in drei Paaren und einer Gruppe zusammengefasst. Die Paare zeichnen sich dadurch aus, dass die enthaltenen Stimuli jeweils im Grundaufbau ähnlich sind (Stimuli Schachbrett-klein und Schachbrett-groß) oder die Stimuli sich lediglich hinsichtlich der Größe ihrer enthaltenen Testfelder unterscheiden (Stimuli White-klein und White-groß, Todorovic-klein und Todorovic-groß). Als Gruppe werden die Stimuli White-Sektoren, White-konzentrisch und Simultaner Helligkeitskontrast betrachtet, da die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeiten insbesondere für deren linke/obere Testfelder sehr ähnlich waren.

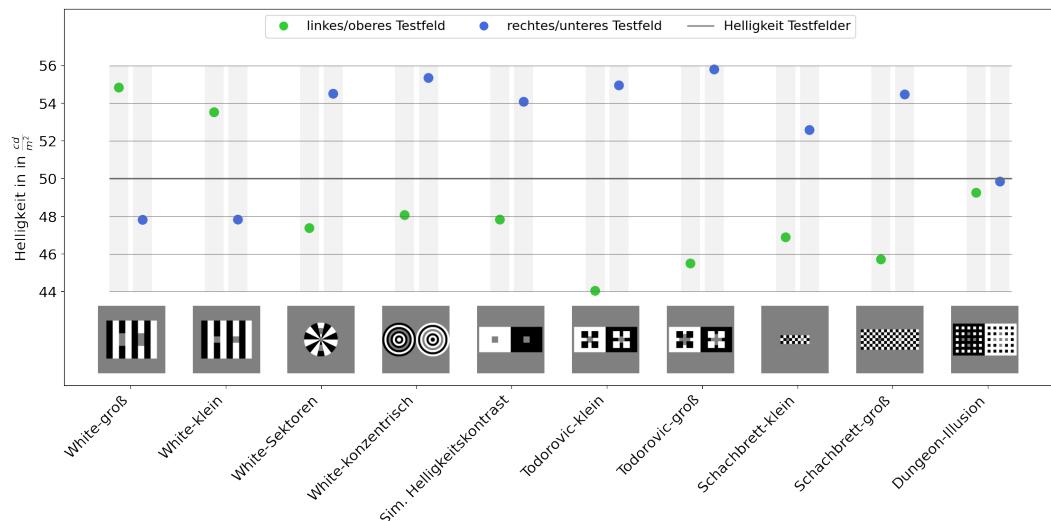


Abbildung 12: Die arithmetischen Mittel der gewählten Helligkeiten aller Versuchspersonen für die Testfelder der untersuchten Stimuli. Jeder Punkt repräsentiert den Mittelwert der von allen Versuchspersonen für ein Testfeld gewählten Helligkeiten. Die grünen Punkte stellen die Werte der linken Testfelder dar, im Falle des Stimulus White-Sektoren des oberen Testfeldes. Die blauen Punkte stellen die Werte für die rechten Testfelder oder das untere Testfeld (Stimulus White-Sektoren) dar. Die dicke horizontale graue Linie stellt die tatsächliche Helligkeit der Testfelder dar, die $50 \frac{cd}{m^2}$ betrug.

In der Abbildung 12 sind die arithmetischen Mittel der gewählten Helligkeiten aller Versuchspersonen für die Testfelder der untersuchten Stimuli visualisiert. Darin ist erkennbar, dass die Versuchspersonen für beide dunkler wirkenden rechten Testfelder der Stimuli White-groß und White-klein im Mittel die gleichen Helligkeiten gewählt haben. Bei den heller wirkenden linken Testfeldern bewerteten die Versuchspersonen das im Stimulus White-groß im Mittel heller als im Stimulus White-klein. Beide Testfelder des Stimuli White-groß sind jeweils exakt doppelt so hoch wie die Testfelder des Stimulus White-klein. Die für das rechte Testfeld des Stimulus White-klein gewählten Helligkeitswerte streuen stärker als die für das rechte Testfeld des Stimulus White-groß gewählten. Dennoch können diese Werte so interpretiert werden, dass die Versuchspersonen die innerhalb eines weißen vertikalen Streifens liegenden Testfelder unabhängig von deren unterschiedlicher Höhe im Mittel gleich hell wahrgenommen haben. Bei den linken Testfeldern, die innerhalb eines schwarzen vertikalen Balkens liegen, nahmen die Versuchspersonen das im Vergleich zum Stimulus White-klein doppelt so hohe Testfeld im Stimulus White-groß heller wahr. Das Verdoppeln der Höhe des Testfeldes, das innerhalb des schwarzen vertikalen Balkens liegt, führte bei den Versuchspersonen also dazu, dass diese das größere Testfeld heller wahrnahmen als das kleinere Testfeld.

innerhalb des schwarzen Balkens im Stimulus White-klein.

Bei den Stimuli Todorovic-klein und Todorovic-groß stellten die Versuchspersonen für beide auf schwarzem Hintergrund und von weißen Quadraten teilweise überlagerten rechten Testfelder hellere Werte ein als für die linken, die auf einem weißen Hintergrund platziert sind und von schwarzen Quadraten teilweise überlagert wurden. Der wahrgenommene Helligkeitsunterschied ist quantitativ annähernd gleich. Dabei nahmen die Versuchspersonen beide Testfelder des Stimulus Todorovic-klein insgesamt im Mittel etwas dunkler wahr als die Testfelder des Stimulus Todorovic-groß. Durch das Vergrößern der Testfelder im Stimulus Todorovic-groß steigt auch die Länge der benachbarten Flächen dieses Testfeldes mit den überlagernden schwarzen und weißen Quadraten. Das hatte zur Folge, dass die Versuchspersonen die Testfelder insgesamt heller wahrnahmen. Der wahrgenommene Helligkeitsunterschied zwischen den beiden Testfeldern blieb bei beiden Stimuli dabei annähernd gleich und war unter allen untersuchten Stimuli am höchsten. Die Helligkeitsillusion wurde also am intensivsten wahrgenommen.

Auch bei den Stimuli Schachbrett-klein und Schachbrett-groß wählten die Versuchspersonen für die rechten Testfelder im Mittel höhere Helligkeitswerte. Diese Testfelder sind an ihren Kanten oben, unten, links und rechts von weißen Quadraten umgeben, während auf den beiden Diagonalen schwarze Quadrate platziert sind. Beim Vergleich beider Stimuli zeigt sich, dass die Versuchspersonen insgesamt den Helligkeitsunterschied beim Stimulus Schachbrett-groß stärker wahrnahmen als beim Stimulus Schachbrett-klein. Beim Stimulus Schachbrett-groß sind die Testfelder nach oben und seitlich von drei beziehungsweise sechs schwarzen und weißen Feldern umgeben, während diese beim Stimulus Schachbrett-klein nur von einem beziehungsweise drei umgeben sind. Eine höhere Anzahl an umgebenden schwarzen und weißen Flächen führte bei beiden Schachbrett-Stimuli also dazu, dass der von den Versuchspersonen im Mittel wahrgenommene Helligkeitsunterschied zwischen den Testfeldern stieg. Dabei wurde sowohl das linke Testfeld des Stimulus Schachbrett-groß von den meisten Versuchspersonen dunkler wahrgenommen als das linke Testfeld des Stimulus Schachbrett-klein als auch das rechte Testfeld des Stimulus Schachbrett-groß von den meisten Versuchspersonen heller wahrgenommen wurde als das rechte Testfeld des Stimulus Schachbrett-klein. Allerdings zählten sowohl die Spannweite als auch der interquartile Abstand der gewählten Helligkeiten für beide Schachbrett-Stimuli zu den höheren unter allen getesteten Stimuli. Insgesamt lässt sich also beim Vergleich beider Stimuli feststellen, dass die Intensität der Illusion im Stimulus Schachbrett-groß im Mittel stärker wirkte als im Stimulus Schachbrett-klein. Allerdings nahmen das nicht alle Versuchspersonen so wahr.

Die von den Versuchspersonen im Mittel gewählten Helligkeiten für die linken/oberen Testfelder der Stimuli White-Sektoren, White-konzentrisch und Simultaner Helligkeitskontrast und die rechten/unteren Testfelder dieser Stimuli sind annähernd gleich (linke/obere Testfelder) oder sehr ähnlich (rechte/untere Testfelder). So sind auch die von den Versuchspersonen im Mittel wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede zwischen den Testfeldern innerhalb dieser Stimuli vergleichbar, wobei der wahrgenommene Helligkeitsunterschied bei beiden White-Stimuli insgesamt etwas höher ist als beim Stimulus Simultaner Helligkeitskontrast. In allen drei Stimuli konnten also deutliche Helligkeitsillusionen beobachtet werden.

Beim Stimulus Dungeon-Illusion ist wie bereits erläutert der wahrgenommene Helligkeitsunterschied zwischen den Testfeldern am geringsten unter allen getesteten Stimuli. Auffällig sind zudem sowohl die hohen Spannweiten als auch die hohen interquartilen Abstände bei den Werten für die gewählten Helligkeiten. Der Vergleich zwischen den Versuchspersonen lässt zudem den Schluss zu, dass diese die Helligkeit der Testfelder sehr unterschiedlich wahrnahmen. Auch hinsichtlich der Richtung der Illusion findet sich unter den Versuchspersonen keine klare Mehrheitswahrnehmung. Aus diesem Grund kann aus den Ergebnissen der psychophysischen Messungen für die Testfelder des Stimulus Dungeon-Illusion keine valide Aussage über die von den Versuchspersonen im Mittel für die Testfelder wahrgenommenen Helligkeiten und die Illusionsintensität innerhalb dieses Stimulus getroffen werden.

3.2 ODOG-Modellvorhersage

3.2.1 Ergebnisse der ODOG-Modellvorhersage

Tabelle 3 enthält die Vorhersagen des ODOG-Modells für die wahrgenommene Helligkeit der Testfelder für alle Stimuli.

Tabelle 3: Die Vorhersagen des ODOG-Modells für die Stimuli aus Abbildung 6 mit den Testfeldern in den Abmessungen gemäß Tabelle 1, dargestellt auf einem Monitor mit 1024×768 Pixel aus einem Betrachtungsabstand von 69.75 cm.

Abb. 6	Stimulus	Modellvorhersage zur wahrgenommenen Helligkeit der Testfelder (in $\frac{cd}{m^2}$)		
		links/oben	rechts/unten	Illusionsstärke
(a)	White-groß	56.2	43.8	12.4
(b)	White-klein	61.9	38.0	23.9
(c)	White-Sektoren	49.8	49.5	0.3
(d)	White-konzentrisch	52.9	47.1	5.8
(e)	Sim. Helligkeitskontrast	36.8	63.2	-26.4
(f)	Todorovic-klein	47.8	52.3	-4.5
(g)	Todorovic-groß	48.5	51.5	-3.0
(h)	Schachbrett-klein	49.0	51.0	-2.0
(i)	Schachbrett-groß	48.9	51.1	-2.1
(j)	Dungeon-Illusion	57.7	42.3	15.5

Die grauen Testfelder in allen Stimuli hatten eine Luminanz von $50 \frac{cd}{m^2}$. Werte in der Tabelle 3, die größer als 50 sind bedeuten, dass das ODOG-Modell vorhersagt, dass dieses Testfeld heller wirkt, als es tatsächlich ist. Werte, die kleiner als 50 sind bedeuten demnach, dass das Modell vorhersagt, dass dieses Testfeld dunkler wirkt. Die in der rechten Spalte in Tabelle 3 enthaltenen Werte sind die Differenz aus der Modellvorhersage für das linke/obere Testfeld und das rechte/untere Testfeld jedes Stimulus als Maß für die vorhergesagte Illusionsstärke. Ein positiver Wert bedeutet hierbei, dass das linke/obere Testfeld der Modellvorhersage zufolge heller als das rechte/untere Testfeld wirkt. Ein negativer Wert bedeutet dementsprechend, dass das linke/obere Testfeld dunkler als das rechte/untere Testfeld wirkt. Der Ausgabewert des ODOG-Modells ist die wahrgenommene Helligkeit als Abweichung von der tatsächlichen Helligkeit einer Fläche. Deshalb sind die Abstände der vom Modell für die Testfelder vorhergesagten Werte zur Schwelle von $50 \frac{cd}{m^2}$ jeweils annähernd gleich. Eine Ausnahme bildet dabei der Stimulus White-Sektoren, für dessen Testfelder das ODOG-Modell jeweils Werte unterhalb von $50 \frac{cd}{m^2}$ vorhersagt.

3.2.2 Vergleich zwischen den experimentellen Ergebnissen und der ODOG-Modellvorhersage

In Abbildung 13 sind die arithmetischen Mittel der wahrgenommenen Helligkeit aller Versuchspersonen für die untersuchten Testfelder und die Vorhersagen der wahrgenommenen Helligkeit des ODOG-Modells für diese visualisiert. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen aus den experimentellen Messungen und den Modellvorhersagen sind in Tabelle 4 enthalten. Positive Werte in der linken und mittleren Spalte bedeuten, dass das Modell für das Testfeld die wahrgenommene Helligkeit zu intensiv voraussagt. Negative Werte bedeuten, dass das Modell die wahrgenommene Helligkeit zu gering vorhersagt. In der rechten Spalte ist die Differenz aus den mithilfe der Modellvorhersage berechneten Illusionsstärken und dem Unterschied der im Mittel von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionsstärken in den Stimuli enthalten. Positive Werte bedeuten hierbei, dass das Modell die Illusionsstärke zu intensiv vorhersagt. Negative Werte bedeuten demnach, dass die Modellvorhersage für die Stärke der Helligkeitsillusion in dem Stimulus zu gering ist.

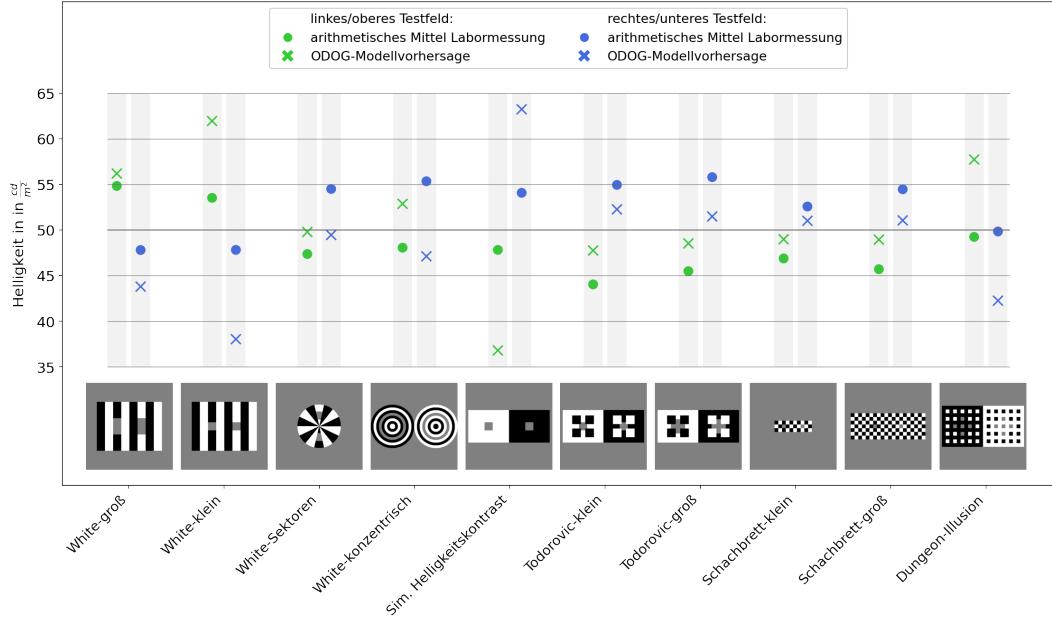


Abbildung 13: Die arithmetischen Mittel der wahrgenommenen Helligkeit aller Versuchspersonen für die untersuchten Testfelder und die Vorhersagen des ODOG-Modells für diese

Bei allen Stimuli mit Ausnahme der Stimuli White-Sektoren, White-konzentrisch und Dungeon-Illusion wurde der vom Modell vorhergesagte Helligkeitsunterschied zwischen den Testfeldern qualitativ von den Versuchspersonen so wahrgenommen. Das Modell sagt also die Richtung der Illusion korrekt voraus. Demnach werden bei den Stimuli White-groß und White-klein jeweils die linken Testfelder heller als die rechten wahrgenommen, bei beiden Todorovic- und Schachbrett-Stimuli jeweils die rechten Testfelder heller als die linken. Bei den Stimuli White-Sektoren, White-konzentrisch und Dungeon-Illusion weichen die Modellvorhersage und die tatsächlich von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede voneinander ab. Die Versuchspersonen nahmen bei diesen Stimuli im Mittel jeweils die rechten/unteren Testfelder heller als die linken/oberen. Das Modell sagt die Richtung der Illusion also genau anders voraus, als von den Versuchspersonen im Experiment wahrgenommen.

Tabelle 4: Wahrgenommene Helligkeit der Testfelder und Illusionsstärke: Differenz zwischen den experimentellen Ergebnissen und den ODOG-Vorhersagen

Abb. 6	Stimulus	Differenz zwischen experimentellen Ergebnissen und Modellvorhersagen zur Helligkeit der Testfelder (in $\frac{cd}{m^2}$)		
		links/oben	rechts/unten	Differenz
(a)	White-groß	1.4	-4.0	5.4
(b)	White-klein	8.4	-9.8	18.2
(c)	White-Sektoren	2.4	-5.0	7.4
(d)	White-konzentrisch	4.8	-8.2	13.0
(e)	Sim. Helligkeitskontrast	-11.0	9.1	-20.1
(f)	Todorovic-klein	3.8	-2.6	6.4
(g)	Todorovic-groß	3.0	-4.3	7.3
(h)	Schachbrett-klein	2.1	-1.6	3.7
(i)	Schachbrett-groß	3.2	-3.4	6.6
(j)	Dungeon-Illusion	8.5	-7.5	16.0

Hinsichtlich der quantitativen Genauigkeit der Vorhersagen zeigt sich ein differenzierteres Bild: Die größten Übereinstimmungen zwischen der Modellvorhersage und den Ergebnissen aus dem Laborexperiment bestehen für das linke Testfeld des Stimulus White-groß und das rechte Testfeld des Stimulus Schachbrett-klein. Die geringsten Übereinstimmungen zwischen der Modellvorhersage und den Ergebnissen aus dem Laborexperiment bestehen für beide Testfelder des Stimulus Simultaner Helligkeitskontrast. Bei allen anderen Testfeldern weicht die Modellvorhersage zwischen etwa 2 und $10 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ von den durch die Versuchspersonen im Mittel wahrgenommenen Helligkeiten ab.

Für die Stimuli Schachbrett-klein und White-groß stimmt die vom Modell vorhergesagte Illusionsintensität am stärksten mit der von den Versuchspersonen wahrgenommenen überein. Ein Vergleich der Stimuli-Paare White-groß und -klein sowie Schachbrett-groß und -klein zeigt jedoch, dass das Modell die anhand der experimentellen Ergebnisse beobachteten Effekte in ihrer Intensität nicht korrekt vorhersagt. Wie im Abschnitt 3.1.4 erläutert, nahmen die Versuchspersonen die Illusion im Stimulus White-groß etwas intensiver wahr als im Stimulus White-klein. Das ODOG-Modell sagt jedoch genau gegenteilig für den Stimulus White-klein eine höhere Illusionsintensität voraus. Beim Stimulus Schachbrett-groß nahmen die Versuchspersonen die Illusion ebenso stärker wahr als beim Stimulus Schachbrett-klein. Diesen Unterschied kann die ODOG-Vorhersage jedoch nicht korrekt modellieren, da für beide Stimuli eine nahezu identische Illusionsstärke vorhergesagt wird. Auffällig ist darüber hinaus, dass das Modell für den Stimulus White-Sektoren nur einen geringen wahrgenommenen Helligkeitsunterschied zwischen beiden Testfeldern vorhersagt, der von den Versuchspersonen wahrgenommene Helligkeitsunterschied jedoch viel stärker ausgeprägt ist.

Beim Stimulus Dungeon-Illusion zeigt sich genau das gegenteilige Bild: Das Modell sagt einen sehr stark wahrgenommenen Helligkeitsunterschied vorher. Tatsächlich ließ die Differenz aus den Mittelwerten der von den Versuchspersonen gewählten Helligkeiten für beide Testfelder keinen eindeutigen Schluss über die wahrgenommene Illusionsstärke und -richtung zu, wie Abschnitt 3.1.1 (Streuung der gewählten Helligkeiten für die Testfelder) erläutert.

3.3 Zusammenhangsanalyse

Korrelation und Kontingenz beschreiben den Zusammenhang oder die Beziehung zwischen zwei Variablen (Sedlmeier und Renkewitz 2018). Im Folgenden wird untersucht, ob anhand der experimentellen Ergebnisse ein Zusammenhang zwischen verschiedenen Stimuli hinsichtlich der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeitsillusionen in diesen Stimuli erkennbar ist.²⁴ Dabei werden sowohl die Intensität als auch die Richtung der wahrgenommenen Helligkeitsillusion betrachtet. Das Vorhandensein eines solchen Zusammenhangs könnte ein Hinweis dafür sein, dass den Stimuli dieselben perzeptuellen Mechanismen zugrunde liegen oder verschiedene perzeptuelle Mechanismen zu ähnlicher Helligkeitswahrnehmung führen.

3.3.1 Korrelation hinsichtlich der Intensität der Helligkeitsillusionen

Ein linearer Zusammenhang zwischen den Datenpunkten zweier Variablen in einem Streudiagramm ist daran erkennbar, dass das Muster dieser Datenpunkte annähernd entlang einer Gerade verläuft. Bei dieser Geraden handelt es sich um die Regressionsgerade. Beim linearen Zusammenhang kann zwischen zwei Richtungen eines Zusammenhangs unterschieden werden: positiv und negativ. Die Begriffe positiv und negativ beschreiben dabei die Steigung der Regressionsgerade, an die sich die einzelnen Datenpunkte annähern. Bei einem positiven Zusammenhang sind hohe Werte der einen Variablen tendenziell mit hohen Werten der anderen Variablen verbunden. Bei einem negativen Zusammenhang gehen hohe Werte

²⁴ Der Quellcode für alle Visualisierungen und Berechnungen im Abschnitt 3.3 (Zusammenhangsanalyse) ist unter https://git.tu-berlin.de/bindermann/bsc_brightness_illusions/-/blob/main/5_zusammenhangsanalyse.ipynb abrufbar.

der einen Variable eher mit niedrigen Werten der anderen Variable einher (Sedlmeier und Renkewitz 2018). Im Falle der experimentellen Ergebnisse könnte dies die Intensität der wahrgenommenen Helligkeitsillusion in einem Stimulus sein.

Die Stärke eines Zusammenhangs zwischen zwei Variablen lässt sich ebenso anhand der Datenpunkte in einem Streudiagramm ablesen: Je stärker sich die Datenpunkte der Regressionsgerade annähern, desto stärker ist der Zusammenhang zwischen den zwei Variablen. Umgekehrt gilt, dass je weiter sich die Datenpunkte zweier Variablen von der Regressionsgeraden entfernen, desto geringer ist der Zusammenhang zwischen diesen beiden Variablen. Wenn zwischen zwei Variablen kein Zusammenhang besteht, lässt sich in einem Streudiagramm kein Muster erkennen. Es entsteht eine sogenannte Punktwolke (Sedlmeier und Renkewitz 2018). Aus den experimentellen Ergebnissen ließen sich unterschiedlich intensive Zusammenhänge zwischen Paaren von Stimuli feststellen.

In der Abbildung 14 werden solche Zusammenhänge exemplarisch für drei Paare von Stimuli dargestellt. Die darin enthaltenen Datenpunkte sind jeweils das arithmetische Mittel der wahrgenommenen Illusionsstärke einer Versuchsperson für den einen Stimulus auf der x-Achse und das arithmetische Mittel der wahrgenommenen Illusionsstärke derselben Versuchsperson für den anderen Stimulus auf der y-Achse.

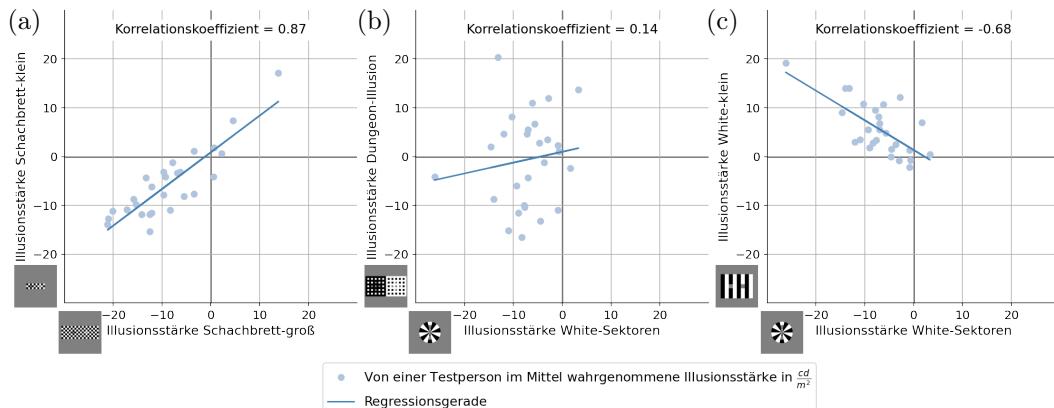


Abbildung 14: Die von den Versuchspersonen im Mittel wahrgenommene Illusionsstärke für Paare von Stimuli als Streudiagramme: Das linke Diagramm (a) stellt einen stark positiven Zusammenhang dar und enthält auf der x-Achse die Werte für den Stimulus Schachbrett-groß, auf der y-Achse die Werte derselben Versuchspersonen für den Stimulus Schachbrett-klein. Das mittlere Diagramm (b) stellt einen geringen Zusammenhang dar und enthält auf der x-Achse die Werte für den Stimulus White-Sektoren, auf der y-Achse die Werte derselben Versuchspersonen für den Stimulus Dungeon-Illusion. Das rechte Diagramm (c) stellt einen stark negativen Zusammenhang dar und enthält auf der x-Achse die Werte für den Stimulus White-Sektoren, auf der y-Achse die Werte derselben Versuchspersonen für den Stimulus White-klein. Die blauen Linien sind jeweils die Regressionsgeraden.

Das Diagramm in Abbildung 14 (a) visualisiert die Datenpunkte für beide Schachbrett-Stimuli. Insbesondere bei den Datenpunkten im linken unteren Quadranten und im Zentrum des Diagramms ist deutlich zu erkennen, wie stark sich der Großteil dieser Werte verhältnismäßig dicht entlang der steigenden Regressionsgerade befindet. Daraus lässt sich ein starker linearer Zusammenhang zwischen den dargestellten Werten ablesen: Versuchspersonen nahmen die Illusionen in beiden Stimuli also ähnlich intensiv wahr.

Kein solcher Zusammenhang lässt sich hingegen erkennen, wenn man die experimentellen Ergebnisse für die Stimuli White-Sektoren (Werte an der x-Achse angetragen) und Dungeon-Illusion (Werte an der y-Achse angetragen) betrachtet, wie im Diagramm in Abbildung 14 (b) dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte bilden eine Punktwolke mit variierenden Abständen zur Regressionsgeraden. Diese hat nur einen leichten Anstieg, was ein Indiz für einen nur geringen

positiven Zusammenhang zwischen den Werten für die beiden Stimuli darstellt. Allerdings muss bei Betrachtung der Lage der Datenpunkte davon ausgegangen werden, dass kein nennenswerter Zusammenhang zwischen den von den Versuchspersonen im Mittel in den Stimuli wahrgenommenen Illusionen besteht.

Ein negativer Zusammenhang wird im Diagramm in Abbildung 14 (c) visualisiert: Auf der x-Achse sind die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionsstärken für den Stimulus White-Sektoren dargestellt. Die y-Achse enthält die von denselben Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionsstärken für den Stimulus White-klein. Auch hier lässt sich der starke Zusammenhang zwischen den experimentellen Werten beider Stimuli erkennen. Die Datenpunkte gruppieren sich überwiegend sehr dicht entlang der Regressionsgerade. Deren negativer Anstieg zeigt, dass zwischen den Werten ein negativer Zusammenhang besteht. Im Stimulus White-klein nahmen die Versuchspersonen im Mittel das linke Testfeld heller wahr als das rechte, im Stimulus White-Sektoren das untere heller als das obere. Je intensiver eine Versuchsperson also diese Illusionsrichtung im Stimulus White-klein (linkes Testfeld heller als rechtes) wahrnahm, desto intensiver nahm diese Versuchsperson auch die beschriebene Illusionsrichtung im Stimulus White-Sektoren (unteres Testfeld heller als oberes) wahr.

Um zu untersuchen, wie stark ein Zusammenhang zwischen den experimentellen Ergebnissen für die einzelnen Stimuli ist, wird im Folgenden der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson für Paare von Stimuli untersucht. Bei dem Korrelationskoeffizienten nach Bravais und Pearson handelt es sich um ein Maß für den Zusammenhang zwischen zwei metrisch skalierten Merkmalen. Dabei beschreibt der Korrelationskoeffizient den linearen Zusammenhang zwischen diesen Merkmalen. Linearität bedeutet hierbei, dass sich die Werte der Merkmale in einem konstanten Verhältnis oder linear zueinander verhalten. Metrisch skalierte Merkmale müssen sich hinsichtlich von Gleichheit und Ungleichheit unterscheiden lassen (nominale Skalierung) und es muss eine Rangordnung zwischen einzelnen Merkmalsausprägungen gebildet werden können (ordinale Skalierung). Zudem müssen die Abstände zwischen den einzelnen Merkmalsausprägungen eindeutig definiert und vergleichbar sein, zum Beispiel durch Zuordnung von Zahlen und Maßeinheiten. Dabei werden die Messwerte den Merkmalsausprägungen so zugeordnet, dass gleich große Unterschiede zwischen Messwerten auch gleich große Unterschiede zwischen Merkmalsausprägungen bedeuten (Krickhahn 2017; Sedlmeier und Renkewitz 2018).

Bei den betrachteten Werten handelt es sich um die Daten aus den experimentellen Messungen. Diese Daten setzen sich aus Einzelwerten zusammen, die wiederum von den Versuchspersonen durch das Anpassen der Helligkeit in äquidistanzen Schritten generiert wurden. Diese Daten wurden nach dem Experiment in Luminanzwerte in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ umgerechnet. Aus diesem Grund wird für die folgende Betrachtung angenommen, dass es sich bei den experimentellen Ergebnissen um metrisch skalierte Werte handelt.²⁵

Der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson r ist definiert als

$$r = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y}, \quad (2)$$

wobei s_{XY} die Kovarianz zwischen den Merkmalen X und Y ist, s_X die Standardabweichung von dem Merkmal X und s_Y die Standardabweichung von dem Merkmal Y ist. Dabei gilt für die Kovarianz

$$s_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (3)$$

²⁵. Da die Versuchspersonen im Experiment keinen geringeren Wert als die als Minimalwert definierte Helligkeit von 0 $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ auswählen konnten, enthalten die Ergebnisse des Experiments einen absoluten Nullpunkt. Da auch praktisch keine Bildpunkte geringerer Helligkeit als die schwarzen mit einer Luminanz von 0 $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ dargestellt werden können, existiert bei den gemessenen Werten sogar ein inhaltlich bedeutungsvoller Nullpunkt. Somit haben diese metrisch skalierten Werte sogar Ratioskalenniveau (Sedlmeier und Renkewitz 2018).

wobei x_i und y_i die einzelnen Daten des Merkmals X und Y sind, \bar{x} und \bar{y} die arithmetischen Mittel für die Merkmale X und Y sind und n die Gesamtzahl der Daten ist. Für die Standardabweichung gilt

$$s_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

wobei wiederum x_i die einzelnen Daten des Merkmals X sind, \bar{x} das arithmetische Mittel für die Merkmale X und n die Gesamtzahl der Daten ist (Krickhahn 2017).

Der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Je stärker der lineare Zusammenhang zwischen den einzelnen Daten der verglichenen Merkmale ist, desto stärker nähert sich der Korrelationskoeffizient dem Wert -1 (im Falle negativer Korrelation) oder 1 (im Falle positiver Korrelation) an. Je stärker sich der Korrelationskoeffizient 0 nähert, desto geringer ist der lineare Zusammenhang zwischen den Daten der verglichenen Merkmale (Krickhahn 2017).

In der Abbildung 15 sind die Paare von Stimuli als Heatmap visualisiert, deren Korrelationskoeffizienten nach Bravais und Pearson kleiner/gleich -0.5 oder größer/gleich 0.5 sind. Für diese Paare kann aus den experimentellen Ergebnissen also ein stärkerer Zusammenhang berechnet werden.

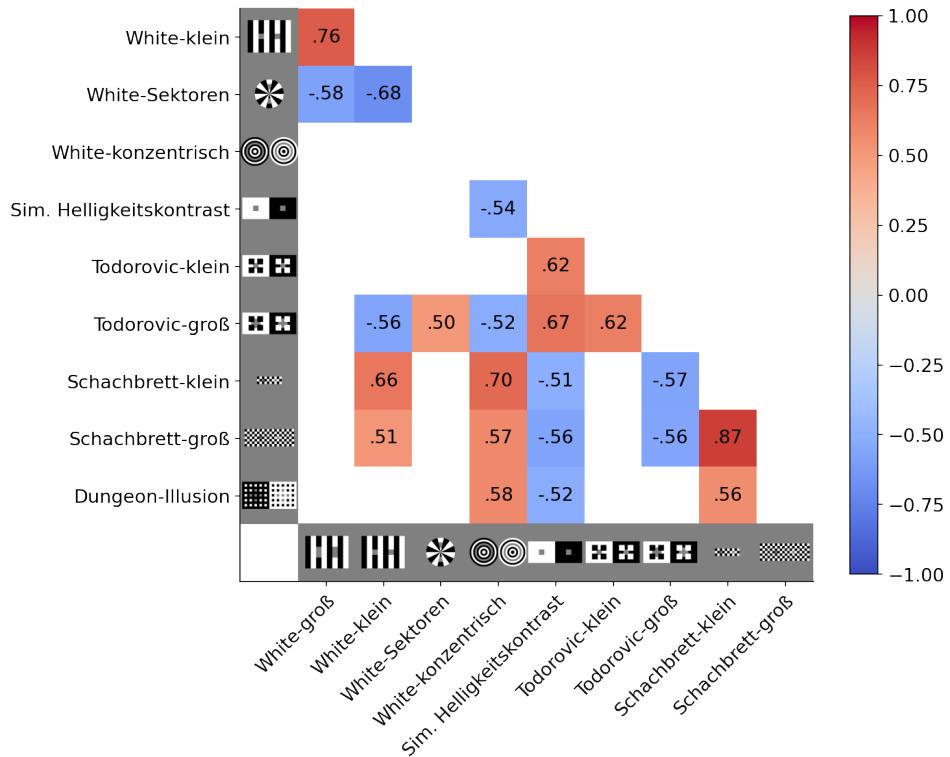


Abbildung 15: Paare von Stimuli mit einem Korrelationskoeffizienten ≤ -0.5 oder ≥ 0.5 hinsichtlich der Intensität der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusion

Am stärksten korrelieren die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionsintensitäten in den Stimuli-Paaren White-groß und White-klein sowie Schachbrett-groß und Schachbrett-klein. Bei den Stimuli White-groß nahmen die Versuchspersonen im Mittel die linken Testfelder heller wahr als die rechten. Der hohe Korrelationskoeffizient zeigt, dass Versuchspersonen, die in dem einen Stimulus die beschriebene Illusionsintensität hoch wahrnahmen, häufig auch in dem anderen Stimulus dieselbe hohe Illusionsintensität wahrnahmen.

Noch stärker ist dieser Zusammenhang bei den experimentellen Werten des Stimuli-Paares Schachbrett-klein und Schachbrett-groß. Deren Werte korrelieren am stärksten unter allen möglichen Kombinationen von paarweise verschiedenen Stimuli. Bei diesen Stimuli konnte anhand der experimentellen Ergebnisse beobachtet werden, dass die Mehrheit der Versuchspersonen die rechten Testfelder in den Stimuli heller wahrnahm als die linken. Der hohe Korrelationskoeffizient zeigt, dass je intensiver die Versuchspersonen diese Helligkeitsillusion in dem einen Stimulus wahrnahmen, desto eher tendierten sie auch dazu, diese Illusion in dem anderen Stimulus intensiver wahrzunehmen. Dabei nahmen die Versuchspersonen die Illusionsintensität im Stimulus Schachbrett-groß insgesamt im Mittel höher wahr als im Stimulus Schachbrett-klein.

Die stärkste negative Korrelation wurde für die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusionen in den Stimuli White-Sektoren und White-klein berechnet. Wie schon anhand der Abbildung 14 im vorangegangenen Abschnitt erläutert, nahmen beim Stimulus White-klein die Versuchspersonen im Mittel das linke Testfeld heller wahr als das rechte, im Stimulus White-konzentrisch das untere heller als das obere. Je intensiver eine Versuchsperson diese Illusionsrichtung im Stimulus White-klein wahrnahm, desto intensiver nahm diese Versuchsperson auch die beschriebene Illusionsrichtung im Stimulus White-konzentrisch wahr.

In den Stimuli Todorovic-klein und Todorovic-groß nahmen die Versuchspersonen wie im Abschnitt 3.1.4 erläutert die Illusionen ähnlich intensiv wahr. Der Korrelationskoeffizient für die von den Versuchspersonen wahrgenommene Illusionsintensität zeigt, dass es bei diesen Werten auch einen messbaren Zusammenhang gibt. Überdies war die Stärke der beobachteten Illusionen bei diesem Stimulus unter allen untersuchten Stimuli am intensivsten.

3.3.2 Kontingenz hinsichtlich der Richtung der Helligkeitsillusionen

Bei den von den Versuchspersonen für die Testfelder gewählten Helligkeiten handelt es sich, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, um metrisch skalierte Merkmale. Im Folgenden soll untersucht werden, ob sich aus den Ergebnissen hinsichtlich der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Richtung der Illusion ein Zusammenhang erkennen lässt. Die Richtung der Illusion gibt an, ob eine Versuchsperson jeweils das eine Testfeld heller wahrnahmen als das andere oder aber, ob nach der Wahrnehmung der Versuchsperson sogar beide Testfelder gleich hell waren. Werden die experimentellen Ergebnisse auf diese Art betrachtet, so haben diese Werte nominales Niveau, sie sind nominalskaliert. Die einzelnen Werte lassen sich also hinsichtlich der Richtung der Illusion unterscheiden, jedoch lassen sich zwischen den Werten keine Rangordnung und auch keine skalierbare Metrik bilden.

Um den Zusammenhang zwischen diesen nominalskalierten Werten zu untersuchen, wird im Folgenden der Kontingenzkoeffizient nach Pearson berechnet. Dieser Koeffizient ist ein normiertes Maß für den Zusammenhang und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je näher der Kontingenzkoeffizient an dem Wert 1 liegt, desto stärker ist der berechnete Zusammenhang zwischen den verglichenen Daten. Liegt der Kontingenzkoeffizient hingegen bei 0, dann besteht kein Zusammenhang. Der Kontingenzkoeffizient basiert auf dem Chi-Quadrat (χ^2), einem statistischen Zusammenhangsmaß, das über die folgende Kontingenztabelle (Tabelle 5) berechnet wurde (Krickhahn 2017).

Tabelle 5: Kontingenztabelle zur von den Versuchspersonen wahrgenommenen Richtung der Illusion in den Stimuli. Die Einzelwerte in den Spalten (a) bis (j) enthalten die Anzahl an Versuchspersonen, die die jeweilige Richtung der Illusion wie angegeben wahrgenommen haben. Am Ende der Zeilen und Spalten sind die Summen der Versuchspersonen je Zeile und Spalte angegeben.

Richtung der Illusion	Stimulus (Abbildung 6)										\sum
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	
Testfelder links/oben heller	25	23	2	3	6	1	0	5	5	14	84
Testfelder rechts/unten heller	2	3	25	24	21	26	26	22	22	13	184
Testfelder gleich hell	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2
\sum	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	270

Anhand der Zeilen- und Spaltensummen in Tabelle 5 ist ersichtlich, dass bei den Stimuli White-groß und White-klein die meisten Versuchspersonen die linken Testfelder heller als die rechten wahrgenommen haben. Bei allen anderen Stimuli mit Ausnahme des Stimulus Dungeon-Illusion nahm die überwiegende Mehrheit der Versuchspersonen die rechten oder oberen Testfelder heller wahr. Die beiden Testfelder in den Stimuli White-klein und Todorovic-groß wurden jeweils von einer Versuchsperson sogar gleich hell wahrgenommen.

Der Kontingenzkoeffizient nach Pearson K^P ist definiert als

$$K^P = \sqrt{\frac{\chi^2}{n + \chi^2} \cdot \frac{M}{M - 1}}, \text{ mit } M = \min(k, m), \quad (5)$$

wobei n die Summe der Einzelwerte in der Kontingenztabelle, m die Zeilenanzahl und k die Spaltenanzahl ist. Dabei gilt

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{(n_{ij} - \tilde{n}_{ij})^2}{\tilde{n}_{ij}}, \quad (6)$$

wobei i der Zeilen- und j der Spaltenindex ist, n_{ij} der Wert der i -ten Zeile und der j -ten Spalte (ij -te Zelle) ist und \tilde{n}_{ij} den für die ij -te Zelle erwarteten Wert der absoluten Häufigkeit unter Unabhängigkeit der beiden Merkmale. Dabei ist \tilde{n}_{ij} die zu erwartende Häufigkeit in der Tabellenzelle (i, j) mit

$$\tilde{n}_{ij} = \frac{n_{i\bullet} \cdot n_{\bullet j}}{n}, \quad (7)$$

wobei $n_{i\bullet}$ die Gesamthäufigkeit in der i -ten Zeile der Tabelle über alle Spalten und $n_{\bullet j}$ die Gesamthäufigkeit in der j -ten Spalte über alle Zeilen hinweg ist (Krickhahn 2017).

Für die in Tabelle 5 enthaltenen Werte ergibt sich $\chi^2 = 143.52$. Damit gilt durch Einsetzen der Werte in Gleichung (5):

$$K^P = \sqrt{\frac{143.52}{270 + 143.52} \cdot \frac{3}{3 - 1}} = 0.72 \quad (8)$$

Anhand des Kontingenzkoeffizienten nach Pearson konnte somit gezeigt werden, dass es einen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Stimulus und der durch die Versuchspersonen wahrgenommene Richtung der Illusion gibt. Die Höhe des Koeffizienten von 0.72 ist zudem ein Zeichen dafür, dass der vermutete Zusammenhang stark ausgeprägt ist. Die in der Tabelle 5 enthaltenen Werte sind also nicht zufällig verteilt sondern zeigen deutlich, wie die Mehrheit der Versuchspersonen die Richtung der Illusion in dem jeweiligen Stimulus wahrnimmt.

4 Diskussion

4.1 Methodischer Ansatz und Qualität der Daten

Grundlage jeder Datenanalyse bilden valide und zuverlässige Daten. Valide meint, dass bei dem Experiment das gemessen wurde, was gemessen werden sollte. Zuverlässig heißt, dass auch wiederholte Messungen unter vergleichbaren Bedingungen zu gleichen Werten führen (Krickhahn 2017).

Über alle 1620 im Experiment für die wahrgenommene Helligkeit erhobenen Einzelwerte betragen der Median und das arithmetische Mittel $50.5 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Die Lage dieser Mittelwerte kann als Indiz dafür gesehen werden, dass die Versuchspersonen über alle Stimuli hinweg betrachtet die Testfelder im Mittel so hell wahrgenommen haben, wie sie auf dem Monitor dargestellt waren. Dieser Umstand kann zudem so bewertet werden, dass das Testdesign, der Versuchsaufbau und die Methode des Matchings geeignet waren, die von den Versuchspersonen tatsächlich wahrgenommen Helligkeit zu messen.

Es fand nach dem Experiment keine standardisierte Befragung statt. Allerdings äußerten sich einige Versuchspersonen im Gespräch nach dem Experiment dazu, wie sie das Experiment und die Stimuli wahrgenommen haben. Keine der Versuchspersonen gab an, mit der Aufgabenstellung oder der Testdurchführung überfordert gewesen zu sein. Einzelne Versuchspersonen äußerten jedoch, dass sie bei manchen Stimuli das Gefühl hatten, nicht den Punkt zu finden, an dem das Vergleichsfeld genauso hell wie das Testfeld auf sie wirkte.

So gaben mehrere Versuchspersonen an, dass es ihnen bei den Stimuli Dungeon-Illusion und White-konzentrisch am schwierigsten gefallen sei, die im Testfeld wahrgenommene Helligkeit am Vergleichsfeld einzustellen. Beim Stimulus White-konzentrisch hatten einige Versuchspersonen zudem den Eindruck, dass sich die Helligkeit des Testfeldes veränderte, abhängig davon, an welche Stelle des Kreises sie gerade sahen.

Der Stimulus Dungeon-Illusion bestand als einziger getesteter Stimulus aus mehreren Testfeldern, für die die Versuchspersonen ihre wahrgenommene Helligkeit in einem Wert adjustieren sollten. Einzelne Versuchspersonen berichteten davon, zwischen den einzelnen Testfeldern Helligkeitsunterschiede wahrgenommen zu haben.

4.2 Aussagekraft und Begrenztheit der gewonnenen Daten

Die Versuchspersonen nahmen die Testfelder in den Stimuli wie im Abschnitt 3 erläutert überwiegend unterschiedlich hell wahr. Jedoch hatten alle Testfelder eine tatsächliche Luminanz von $50 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$. Dass diese Testfelder auf die Versuchspersonen unterschiedlich hell wirkten, muss also im Aufbau der Stimuli oder der Geometrie ihrer Flächen begründet sein. Dadurch entstanden für die Versuchspersonen Helligkeitsillusionen innerhalb der Stimuli. Diese entsprachen in ihrer Richtung den vor dem Experiment erwarteten und in der Literatur beschriebenen Richtungen.

Für alle getesteten Stimuli mit Ausnahme des Stimulus Dungeon-Illusion konnte zudem gezeigt werden, in welcher Richtung der Großteil der Versuchspersonen die Richtung der Illusion innerhalb der Stimuli wahrnahm. Dieser Großteil der Versuchspersonen umfasste dabei zwischen 21 von 27 Personen (Stimulus Simultaner Helligkeitskontrast) und 26 von 27 Personen (beide Todorovic-Stimuli). Die von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeiten streuten für einzelne Testfelder stärker als für andere. Damit einher ging auch eine stärkere Streuung der wahrgenommenen Helligkeitsillusionen innerhalb einzelner Stimuli.

Beim Vergleich der Illusionsstärke mahnen Robinson et al. (2007) jedoch zur Vorsicht, da Menschen die Intensität von Helligkeitsillusionen sehr unterschiedlich wahrnehmen, auch wenn sie die Illusion in derselben Richtung sehen. Dieser Umstand konnte vor allem beim Stimulus Dungeon-Illusion beobachtet werden: Bei diesem variierten die von Versuchspersonen eingestellten Helligkeitswerte für beide Testfelder am stärksten unter allen untersuchten Testfeldern. Damit variierte auch die Intensität der Helligkeitsillusion stark. Eine Ursache könnte darin liegen, dass bei der Helligkeitswahrnehmung der Testfelder dieses Stimulus bei

den Versuchspersonen unterschiedliche Effekte eine Rolle spielen. Dieses führte im Ergebnis dazu, dass die Versuchspersonen die Helligkeit der Testfelder und damit auch die Intensität der Illusion innerhalb des Stimulus sehr unterschiedlich wahrnahmen.

Der Anstieg der Regressionsgeraden, die Verteilung der Datenpunkte im Streudiagramm, der Korrelations- und der Kontingenzkoeffizient sind Parameter dafür, ob ein Zusammenhang zwischen den betrachteten Werten besteht und wie stark dieser Zusammenhang gegebenenfalls ist. Im Abschnitt 3.3 konnte gezeigt werden, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen den experimentell erhobenen Werten für einzelne Stimuli besteht. Allerdings können diese Parameter keinen Aufschluss darüber geben, wieso ein solcher Zusammenhang besteht oder wodurch dieser ausgelöst wird (Krickhahn 2017). Es wird vermutet, dass dieser Zusammenhang unter anderem darin liegt, dass innerhalb dieser Stimuli jeweils dieselben perzeptuellen Mechanismen wirken oder aber unterschiedliche Mechanismen zu gleichen Ergebnissen führen.

4.3 Ausblick

Die experimentelle Datenerhebung und die Datenanalyse im Rahmen dieser Arbeit waren in ihrem Umfang limitiert. Weitere Erkenntnisse im Zusammenhang mit den untersuchten Fragestellungen könnten durch folgende Schritte erlangt werden.

Denkbar ist zunächst, auf Basis des verwendeten Testdesigns dieselben Stimuli an weiteren Versuchspersonen zu testen. Die so erlangten Ergebnisse könnten verwendet werden, um die Signifikanz der Erkenntnisse aus dieser Arbeit zu untersuchen. Würden wiederum auf Basis des Testdesigns die Stimuli an zumindest einem Teil der Versuchspersonen erneut getestet werden, könnte dies Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit der gewonnenen Daten liefern. Damit wäre es möglich, die Retest-Reliabilität der Daten einzuschätzen.

Die Stimuli-Paare White-klein und White-groß, Todorovic-klein und Todorovic-groß sowie Schachbrett-klein und Schachbrett-groß unterschieden sich jeweils in ihrem Aufbau oder der Größe ihrer Testfelder. Dabei konnte beobachtet werden, wie diese Unterschiede auch zu einer veränderten Illusionswahrnehmung führten. In einem späteren Experiment könnten diese Stimuli-Paare um weitere Varianten ergänzt werden. Damit wäre es möglich, die beobachtete Veränderung der Illusionsintensität genauer zu quantifizieren. Dies könnte beispielsweise helfen, um Rückschlüsse auf den Einfluss zugrunde liegender perzeptueller Mechanismen zu ziehen.

Darüber hinaus wäre es denkbar, die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit auch auf nichtlineare Zusammenhänge zu untersuchen. Der Fokus in dieser Arbeit lag im Finden „einfacher“, linearer Zusammenhänge. Aus diesem Grund wurden keine Analysen durchgeführt, um beispielsweise nichtlineare Zusammenhänge zwischen den einzelnen Messwerten zu finden. Auch fand keine Untersuchung statt, wie die Messwerte verteilt sind und ob sie beispielsweise einer bestimmten Verteilung folgen. Auf dieser Basis könnten die Messwerte auch auf weitere Zusammenhänge untersucht werden. Dabei könnten Erkenntnisse erlangt werden, warum einzelne Stimuli-Paare hinsichtlich ihrer Illusionsintensität stärker korrelieren als andere.

Zudem wäre auch eine Analyse denkbar, warum das ODOG-Modell die Illusionsrichtung für einige der Stimuli nicht korrekt vorhersagt und worin die teilweise starken Abweichungen bei der Modellvorhersage für die Illusionsintensität begründet sind. Unter Umständen berücksichtigen die auf Basis des ODOG-Modells weiterentwickelten Modelle bereits die der Wahrnehmung zugrundeliegenden Mechanismen in einer höheren Präzision und führen so zu genaueren Vorhersagen.

Erkenntnisse aus all diesen Schritten könnten weitere wichtige Hinweise geben, wie das menschliche Sehen und insbesondere der visuelle Wahrnehmungsprozess funktionieren.

Literaturverzeichnis

- Aguilar, Guillermo, und Marianne Maertens. 2020. „Toward reliable measurements of perceptual scales in multiple contexts“. *Journal of Vision* 20, Nr. 4 (April): 19–19. <https://doi.org/10.1167/jov.20.4.19>.
- Blakeslee, Barbara, und Mark E. McCourt. 1999. „A multiscale spatial filtering account of the White effect, simultaneous brightness contrast and grating induction“. *Vision Research* 39 (26): 4361–4377. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00119-4).
- Bruce, Vicki, Patrick R. Green und Mark A. Georgeson. 2003. *Visual perception: Physiology, psychology and ecology*. Hove, New York: Psychology Press.
- Ditzinger, Thomas. 2013. *Illusionen des Sehens: Eine Reise in Die Welt der Visuellen Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Domijan, Dražen. 2015. „A Neurocomputational account of the role of contour facilitation in brightness perception“. *Frontiers in human neuroscience* 9 (93). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00093>.
- Gilchrist, Alan. 2006. *Seeing black and white*. New York: Oxford University Press.
- Kingdom, Frederick A.A. 2011. „Lightness, brightness and transparency: A quarter century of new ideas, captivating demonstrations and unrelenting controversy“. *Vision Research* 50th Anniversary Issue: Part 1, *Vision Research* 51 (7): 652–673. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.09.012>.
- Kingdom, Frederick A.A., und Nicolaas Prins. 2010. *Psychophysics: A practical introduction*. London: Academic Press.
- Krickhahn, Thomas. 2017. *Statistik für Naturwissenschaftler*. Weinheim: Wiley.
- McKinney, Wes. 2019. *Datenanalyse mit Python. Auswertung von Daten mit Pandas, NumPy und IPython*. Heidelberg: O'Reilly, dpunkt.verlag.
- Murray, Richard F. 2020. „A model of lightness perception guided by probabilistic assumptions about lighting and reflectance“. *Journal of Vision* 20 (7): 1–28. <https://doi.org/10.1167/jov.20.7.28>.
- Robinson, Alan E., Paul S. Hammon und Virginia R. de Sa. 2007. „Explaining brightness illusions using spatial filtering and local response normalization“. *Vision Research* 47 (12): 1631–1644. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.02.017>.
- Sedlmeier, Peter, und Frank Renkewitz. 2018. *Forschungsmethoden und Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Hallbergmoos: Pearson.
- Snowden, Robert, Peter Thompson und Tom Troscianko. 2012. *Basic vision: an introduction to visual perception*. Oxford: Oxford University Press.
- White, Michael. 1979. „A new effect of pattern on perceived lightness“. *Perception* 8:413–416.

Abbildungsverzeichnis

1	Skizze zur Helligkeitswahrnehmung	1
2	Beispiele für Kontexteffekte bei der Helligkeitswahrnehmung	3
3	Checkershadow-Illusion von Edward H. Adelson	4
4	Schritte des ODOG-Modells am Beispiel der Variante der White-Illusion	5
5	Vorhersage des ODOG-Modells für die White-Illusion	6
6	Stimuli für das Experiment	9
7	Eingabegerät RESPONSEPiXX HANDHELD	13
8	Bildschirmsicht während des Experiments	14
9	Reihenfolge der Versuchsreize im Experiment	15
10	Arithmetische Mittelwerte der von den Versuchspersonen im Laborexperiment gewählten Helligkeitswerte	20
11	Von den Versuchspersonen wahrgenommene Illusionsintensitäten in den Stimuli	23
12	Arithmetische Mittel der gewählten Helligkeiten aller Versuchspersonen für die Testfelder der untersuchten Stimuli	24
13	Arithmetische Mittel der wahrgenommenen Helligkeit aller Versuchspersonen für die untersuchten Testfelder und die Vorhersagen des ODOG-Modells	27
14	Von den Versuchspersonen im Mittel wahrgenommene Illusionsstärke für Paare von Stimuli als Streudiagramme	29
15	Paare von Stimuli mit einem Korrelationskoeffizienten ≤ -0.5 oder ≥ 0.5 hinsichtlich der Intensität der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Illusion	31

Tabellenverzeichnis

1 Maße der Testfelder in den Stimuli	13
2 Mittelwerte der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Helligkeiten der Testfelder	21
3 Vorhersagen des ODOG-Modells für die Stimuli	26
4 Wahrgenommene Helligkeit der Testfelder und Illusionsstärke: Differenz zwischen den experimentellen Ergebnissen und den ODOG-Vorhersagen	27
5 Kontingenztabelle zur von den Versuchspersonen wahrgenommenen Richtung der Illusion in den Stimuli	33

A Anhang

A.1 Von den Versuchspersonen gewählte Helligkeiten der Testfelder²⁶

Stimulus Abb. 6	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)
Testfeld	(l)	(r)	(l)	(r)	(o)	(u)	(l)	(r)	(l)	(r)
Versuchsperson 1	61.0 51.5 59.5 55.5 52.0 62.0 50.0 66.5 55.0 53.5 59.5 60.5 57.0 63.0 52.0 66.0 50.5 72.0 51.0 69.5									
	52.5 52.5 56.5 55.5 56.5 62.5 47.0 66.0 56.0 41.5 55.0 50.5 56.0 48.5 57.5 58.5 47.0 66.0 41.5 64.5									
	56.0 51.0 57.5 54.0 53.5 62.5 42.5 60.0 56.5 46.5 48.0 53.0 55.5 57.0 47.0 65.5 52.0 72.0 55.0 63.0									
2	57.0 51.0 60.5 57.5 55.5 60.0 53.5 74.5 53.5 52.0 56.0 59.5 52.0 60.5 52.5 64.0 39.5 62.5 46.0 62.5									
	58.5 45.0 51.0 50.5 54.0 53.5 48.5 68.5 47.0 54.0 57.0 51.5 57.5 62.0 42.0 57.5 44.0 66.0 47.5 62.0									
	54.5 52.5 53.5 52.5 50.5 60.0 40.5 68.0 53.5 52.0 54.0 55.0 52.5 57.5 44.0 58.5 45.5 64.0 52.0 60.5									
3	56.0 44.5 44.5 50.0 53.0 52.5 57.5 47.0 43.0 57.5 48.5 56.0 50.5 57.5 50.0 59.0 49.0 57.0 52.0 54.5									
	56.0 47.5 58.5 46.5 48.0 63.0 56.0 52.5 46.5 54.0 40.5 57.5 45.5 58.0 51.0 53.5 41.5 59.0 50.5 46.0									
	63.0 48.0 54.0 44.0 51.5 58.0 55.5 46.5 36.0 53.5 41.5 48.5 45.0 58.0 53.0 60.0 48.5 59.5 57.5 43.0									
4	56.5 58.0 56.5 56.5 54.0 60.5 52.0 61.5 49.5 58.0 51.0 62.5 55.5 65.0 50.5 62.0 48.0 58.5 50.0 69.0									
	59.5 53.5 54.5 55.5 49.5 64.0 59.0 67.5 50.5 65.5 52.0 66.5 56.5 66.0 53.5 60.5 52.0 55.0 69.5 71.5									
	63.5 57.5 61.5 55.0 59.0 65.0 58.0 66.5 49.5 61.5 48.0 62.5 56.0 63.5 55.0 61.0 53.5 56.5 59.0 72.5									
5	60.0 55.0 60.0 60.5 57.5 53.0 53.0 63.5 55.5 55.5 56.0 54.5 56.0 56.5 50.5 63.0 53.5 67.0 51.5 63.0									
	61.5 46.5 56.5 56.0 51.5 58.0 43.0 67.5 59.0 49.0 53.5 54.0 54.5 55.0 46.5 61.5 51.5 69.0 55.0 57.0									
	55.0 56.5 61.0 53.5 51.5 60.5 44.5 64.0 44.0 57.0 47.5 59.0 50.5 59.0 50.0 68.5 57.0 63.5 54.5 44.5									
6	67.0 52.0 62.0 55.5 47.0 65.5 49.0 68.0 48.0 56.0 40.0 69.5 47.5 58.0 50.0 53.5 52.0 69.0 59.0 72.5									
	63.5 49.5 58.0 39.5 54.5 57.5 50.5 74.5 57.0 60.5 44.0 61.5 51.0 48.0 43.0 56.0 54.0 60.0 50.0 69.0									
	55.0 43.5 53.0 49.5 56.5 58.5 55.0 64.5 55.5 61.0 50.0 64.5 45.5 60.5 51.5 61.0 41.0 65.5 69.5 67.0									
7	47.5 55.5 53.0 56.0 50.5 48.0 54.0 61.0 42.0 69.5 47.0 58.0 52.5 50.0 35.0 51.5 45.5 65.0 53.0 59.0									
	60.0 54.5 44.5 55.0 42.5 42.5 47.5 59.0 45.5 48.5 42.5 54.5 42.0 48.0 36.0 44.5 48.5 45.5 33.0 55.5									
	59.0 57.0 51.0 44.0 49.5 54.5 52.0 48.0 56.0 61.0 48.0 51.5 47.5 60.0 38.0 46.0 42.5 51.0 43.0 47.5									
8	56.0 47.0 54.0 54.0 45.5 42.0 56.5 62.5 47.5 63.0 41.5 56.0 45.5 52.0 40.0 49.0 34.5 56.5 38.0 30.5									
	51.0 49.5 51.0 49.0 37.5 53.5 53.0 54.5 59.5 55.5 42.5 57.0 47.0 55.0 34.0 48.5 31.5 45.0 42.5 39.5									
	57.5 48.0 52.0 54.0 44.5 46.0 53.0 61.5 62.5 49.5 33.5 54.5 43.5 50.5 36.0 50.5 27.0 54.5 44.5 46.5									
9	48.5 49.0 47.5 48.0 46.0 52.0 41.5 54.0 43.5 55.5 42.5 53.0 46.0 55.5 38.0 54.5 39.0 50.0 49.0 40.5									
	57.0 50.0 48.0 48.5 48.5 43.5 40.5 52.5 42.5 45.5 47.0 55.5 45.5 50.5 45.0 53.5 34.5 59.5 40.0 42.5									
	50.0 46.0 46.5 47.5 47.5 48.5 41.0 58.5 46.5 49.0 44.5 53.5 47.5 53.0 44.5 49.0 45.5 55.5 52.5 55.5									
10	52.5 47.0 54.0 47.0 51.0 53.5 47.5 53.5 56.0 56.5 49.0 58.0 47.0 53.5 45.5 47.5 42.5 53.5 38.5 49.0									
	54.0 51.0 51.5 46.5 53.0 51.5 48.0 50.0 49.0 45.5 40.5 55.0 47.5 46.0 47.0 52.5 46.0 57.0 43.5 45.0									
	53.0 49.0 51.0 42.0 53.0 47.0 49.5 53.0 59.5 50.0 48.0 58.5 48.0 56.0 45.0 47.0 44.0 51.0 48.5 43.5									
11	58.5 55.0 51.5 49.5 52.0 53.5 56.0 51.5 51.5 52.0 40.5 62.0 44.0 58.0 43.5 56.5 44.0 52.5 41.0 46.0									
	56.0 44.0 57.5 51.0 53.5 58.5 47.0 56.5 50.0 51.5 47.0 45.5 47.5 52.0 52.0 62.0 44.0 60.5 44.0 54.5									
	53.5 40.5 57.5 45.5 39.0 53.5 48.0 57.0 49.5 42.0 41.0 53.5 28.0 51.5 41.0 52.5 47.5 59.0 48.0 45.5									
12	54.0 45.5 52.5 43.5 46.0 54.5 48.5 52.0 40.0 63.0 38.5 56.0 43.0 58.0 49.5 59.0 46.0 52.5 49.5 39.0									
	55.0 46.0 53.0 41.5 44.5 55.5 46.5 51.5 39.0 54.5 38.0 52.0 43.5 56.5 48.0 48.5 44.5 51.5 48.0 39.5									
	56.0 47.0 55.0 43.0 44.5 56.0 49.0 57.5 44.5 55.0 44.5 58.0 41.5 60.5 47.5 47.5 49.5 56.5 46.0 40.5									
13	61.5 51.5 53.0 54.0 46.5 60.5 42.0 67.0 48.0 46.0 46.5 49.0 47.0 54.5 42.0 60.5 50.5 66.0 41.0 52.0									
	53.5 49.5 57.0 51.5 49.0 62.0 44.5 64.0 47.0 51.0 43.5 48.5 44.5 53.0 49.0 58.5 46.5 56.5 44.5 67.0									
	54.5 47.5 56.0 50.0 55.0 61.0 46.0 60.5 54.0 47.0 49.0 50.0 45.0 51.5 48.0 55.5 45.5 62.5 42.0 54.0									
14	53.5 51.5 49.0 49.5 46.5 51.5 52.5 57.5 44.0 60.5 44.0 57.5 44.5 58.0 53.5 49.5 51.0 54.5 46.5 46.0									
	49.5 46.0 47.0 46.0 48.5 48.5 45.0 51.0 46.5 55.0 41.0 53.0 41.0 56.0 47.0 51.5 45.0 58.0 52.5 48.0									
	47.5 46.5 46.5 49.5 49.0 53.0 54.5 52.0 45.0 54.5 44.5 55.5 46.0 58.5 47.0 56.0 51.5 54.0 54.5 49.0									
15	60.5 51.0 43.0 40.0 42.5 58.5 43.0 46.5 43.5 53.0 46.0 55.0 45.5 51.5 39.5 54.5 38.0 61.0 46.5 40.0									
	61.5 35.5 56.0 46.0 45.5 53.0 43.0 53.0 49.5 51.5 42.5 52.0 45.0 45.5 42.5 50.5 37.0 52.5 44.0 44.5									
	47.5 43.5 54.0 42.5 51.0 49.0 51.0 42.5 43.5 47.0 40.5 51.5 39.0 50.5 40.5 50.0 37.0 50.0 45.0 37.0									

Fortsetzung auf der nächsten Seite

26. Die Tabelle enthält die von den Versuchspersonen in jedem einzelnen Durchgang für die linken (l)/oberen (o) und rechten (r)/unteren (u) Testfelder jedes Stimulus gewählten Helligkeiten in $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$.

A Anhang

	Stimulus Abb. 6 Testfeld	(a) (l) (r)	(b) (l) (r)	(c) (o) (u)	(d) (l) (r)	(e) (l) (r)	(f) (l) (r)	(g) (l) (r)	(h) (l) (r)	(i) (l) (r)	(j) (l) (r)	
Versuchsperson	16	60.5 42.5 57.0 54.5 47.5 56.5 48.5 58.5 50.0 65.0 48.0 59.5 43.0 67.5 50.5 54.0 52.5 53.0 64.5 47.0	57.0 46.0 56.0 35.5 51.5 55.5 54.0 61.5 51.0 60.5 44.5 63.0 41.0 62.0 58.0 49.0 51.5 54.5 56.5 46.5	59.5 52.0 52.5 43.5 45.5 51.0 47.5 58.5 54.5 56.5 44.0 53.0 47.0 57.0 54.0 57.5 61.0 51.0 56.0 50.5								
17	50.5 47.0 55.0 42.5 51.0 53.0 44.0 67.5 48.0 45.0 38.5 49.0 49.0 46.0 45.0 40.0 38.0 47.0 47.0 38.0	59.5 44.5 55.5 38.0 46.5 51.5 43.5 46.0 36.0 54.0 35.0 54.5 42.0 56.0 42.0 42.5 48.0 40.0 53.0 39.5	54.0 45.5 52.0 45.5 47.5 49.0 42.5 47.0 40.5 54.5 40.0 57.5 43.0 52.5 41.0 40.0 46.5 43.5 51.5 38.0									
18	42.5 45.0 42.5 46.0 47.0 46.0 36.5 50.0 49.5 50.5 48.0 45.0 48.0 50.0 39.5 47.5 43.0 38.5 33.5 37.0	44.0 44.5 44.5 42.0 41.0 51.0 34.5 48.0 40.5 49.0 44.5 44.0 47.0 47.0 39.5 47.5 39.0 52.5 38.0 56.5	51.0 42.0 56.5 45.5 39.5 53.5 42.0 58.5 53.5 47.5 48.0 53.5 46.5 49.5 42.0 49.0 47.5 49.0 31.0 40.0									
19	50.0 40.5 41.5 37.5 42.0 49.0 39.0 37.0 40.5 49.0 33.5 44.5 42.0 47.5 43.5 38.5 40.5 44.5 45.5 43.5	45.0 42.0 46.0 41.0 32.5 42.5 39.0 43.5 44.0 57.5 35.0 53.0 36.5 52.0 41.5 47.0 36.5 43.0 44.0 37.0	44.0 34.5 44.5 39.0 41.0 41.0 31.0 45.5 35.5 44.5 39.0 44.0 33.5 38.0 40.0 36.0 37.5 37.5 43.0 32.0									
20	51.0 53.0 46.0 49.5 49.5 42.5 34.5 43.0 47.5 60.5 36.0 58.0 38.0 56.5 42.5 54.5 41.0 53.0 51.0 38.0	44.5 49.0 46.0 44.0 44.0 46.5 42.5 61.0 51.0 52.0 36.5 53.0 35.5 53.0 37.5 44.0 34.0 53.0 48.0 37.0	49.0 50.0 49.5 46.5 50.5 45.0 47.5 55.0 39.5 56.0 39.0 58.0 33.5 55.0 39.0 44.0 49.5 47.5 53.5 36.5									
21	55.0 49.5 48.5 40.5 40.0 64.5 47.5 51.0 41.5 55.5 45.5 43.5 34.5 66.5 50.0 59.0 44.0 46.5 36.0 42.5	52.0 40.0 68.0 42.0 48.5 64.0 41.0 53.0 39.0 41.5 45.0 46.0 38.0 51.0 47.0 48.0 31.5 54.5 44.5 59.0	50.5 44.0 48.5 40.5 47.0 49.0 38.5 47.0 42.5 42.0 38.5 44.5 45.0 49.0 42.5 45.5 38.5 53.0 44.0 49.0									
22	64.0 54.0 62.0 48.5 47.5 50.5 42.0 55.5 54.0 58.5 49.5 51.0 51.0 59.0 59.0 62.0 56.0 55.0 42.0 51.5	52.5 51.5 52.5 53.0 44.0 60.5 46.0 54.0 52.0 53.5 44.0 57.5 44.0 60.5 50.0 52.0 52.5 57.5 47.5 54.0	62.0 48.5 54.5 51.0 50.0 58.5 47.0 51.5 53.0 59.5 43.0 67.0 44.0 64.5 50.0 57.5 62.5 57.0 54.5 56.5									
23	53.5 55.5 55.5 64.0 53.0 69.5 59.5 69.0 51.0 76.0 41.0 69.5 36.0 59.0 47.0 57.0 48.5 63.5 68.0 51.5	56.0 55.5 62.5 48.0 49.0 60.0 52.0 54.5 47.5 54.0 44.5 62.0 44.0 60.5 41.5 61.0 41.5 50.5 62.0 51.0	60.0 45.0 55.5 52.5 44.5 53.0 41.5 53.0 48.5 55.0 44.5 48.5 52.5 56.0 51.5 57.5 45.0 58.5 39.5 53.0									
24	49.5 40.0 51.5 49.0 41.5 56.5 49.5 50.5 42.5 48.0 37.5 45.5 42.0 53.5 40.5 46.0 35.0 45.0 38.5 41.0	54.5 42.5 51.5 40.5 40.5 52.0 48.5 52.5 51.0 52.5 38.0 52.0 45.5 48.0 46.0 47.5 40.0 49.0 58.0 52.5	49.0 44.0 49.0 35.5 40.5 58.0 47.5 47.5 42.0 64.0 43.0 57.5 33.0 56.0 46.5 52.0 34.0 43.0 52.5 49.5									
25	51.5 43.5 51.5 40.5 40.0 56.0 58.0 40.0 40.0 57.5 38.0 53.5 40.0 60.0 58.5 40.5 59.5 43.0 66.0 43.0	54.0 37.5 54.0 40.0 42.0 50.5 61.5 37.0 39.0 54.5 40.0 52.5 38.5 64.0 56.5 40.0 54.0 42.5 58.0 39.0	52.0 39.5 56.0 39.0 38.0 53.0 52.5 36.5 37.5 53.0 37.0 51.5 39.0 55.0 60.5 43.5 56.5 43.0 57.0 38.0									
26	51.5 45.5 51.0 51.5 46.5 51.0 46.5 47.5 51.0 47.0 42.0 47.5 49.5 48.5 46.0 55.0 47.0 58.0 45.5 40.5	57.0 48.5 48.5 45.5 44.0 45.5 45.0 54.0 57.0 48.5 48.5 48.0 44.0 57.5 44.5 47.0 44.0 56.0 48.0 47.0	48.0 48.5 58.0 56.5 49.0 45.5 48.5 49.5 46.0 49.0 46.0 51.0 48.5 48.5 54.5 46.5 49.5 50.0 49.0 48.0									
27	62.0 55.0 67.5 50.0 44.5 66.0 59.0 60.5 46.5 64.5 44.5 68.5 52.0 76.0 61.5 57.0 56.0 50.5 51.5 66.5	64.0 47.0 71.0 48.0 38.5 64.5 65.0 51.0 47.5 64.0 40.0 74.5 48.5 68.5 57.0 48.5 51.0 50.0 62.5 63.0	56.0 40.0 62.0 45.0 34.5 65.5 54.5 52.0 42.0 59.0 32.5 59.0 41.0 69.0 57.5 48.5 51.5 44.5 58.5 55.5									

A.2 Teilnahmeinformationen, Datenschutzhinweise und Einverständniserklärung für die Versuchspersonen

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Computational Psychology
Sekretariat MAR 5-5
Marchstr. 23
10587 Berlin
Tel. +49 30 314-75771

Stand: 6. November 2021

Teilnahmeinformationen, Datenschutzhinweise und Einverständniserklärung

Laborexperiment zur psychophysischen Messung der Helligkeitswahrnehmung beim Menschen

Versuchsleitung: Marcus Bindermann (Kontakt: bindermann@campus.tu-berlin.de)

Viel Dank für die Bereitschaft zur Teilnahme. Bei dem Experiment geht es um die Messung der menschlichen Helligkeitswahrnehmung. Dazu sitzt die am Versuch teilnehmende Person (Versuchsperson) in einem abgedunkelten Raum vor einem Computermonitor. Auf diesem werden der Versuchsperson insgesamt 60 Testbilder gezeigt. Diese Testbilder bestehen aus schwarzen und weißen Flächen sowie einem grauen Feld. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es, die Helligkeit eines quadratischen Zielfeldes so einzustellen, dass diese mit der Helligkeit des grauen Feldes in dem Testbild nach der Wahrnehmung der Versuchsperson übereinstimmt. Die Helligkeit des quadratischen Zielfeldes kann die Versuchsperson mit einem Tastencontroller einstellen. Hat die Versuchsperson diese Einstellung für ein Testbild abgeschlossen, drückt sie eine Taste. Anschließend wird der Versuchsperson das nächste Bild angezeigt. Das Experiment dauert etwa 1 Stunde.

Folgende Daten werden während des Versuchs gespeichert:

Laufende Nummer der Versuchsperson, Laufende Nummer des Durchgangs, Nummer des Testbildes, Anfangshelligkeit des Zielfeldes, durch die Versuchsperson ausgewählte Helligkeit des Zielfeldes, Zeitstempel

Für die Teilnahme an dem Experiment erhält jede Versuchsperson auf Wunsch eine Aufwandsentschädigung. Diese Aufwandsentschädigung wird von der TU Berlin ausgezahlt und beträgt 10 € für jede volle Stunde der Ver- suchsteilnahme.

Die Teilnahme an dem Experiment ist freiwillig und kann jederzeit und ohne Angabe von Gründen beendet werden. Dadurch entsteht der Versuchsperson kein Nachteil. Die im Rahmen des Experiments erhobenen Daten sowie die Kontaktdataen der Versuchsperson werden vertraulich behandelt. Dazu zählt auch diese Einwilligungserklärung. Die Ergebnisse des Experiments können anonymisiert veröffentlicht werden. Das bedeutet, dass keine der erhobenen Daten einer konkreten Versuchsperson zugeordnet werden können. Die Kontaktdataen der Ver- suchsperson werden in keinem Fall an Dritte weitergegeben und nach Abschluss des Experiments gelöscht. Jede am Versuch teilnehmende Person kann unabhängig davon die sofortige Löschung ihrer Daten verlangen.

- Ich bin darüber in Kenntnis gesetzt worden, dass meine Teilnahme nur erfolgt, wenn ich diese Einwilligungserklärung unterschrieben habe. Dafür wurde mir ausreichend Zeit gegeben und ich konnte meine Bedenken äußern und mich für oder gegen die Teilnahme an dem Experiment entscheiden.
- Ich bin damit einverstanden, dass die erhobenen Daten in anonymisierter Form gespeichert und zu wis- senschaftlichen Zwecken (vgl. Art. 89 DSGVO) ausgewertet werden.
- Ich habe die Teilnahmeinformationen vollständig gelesen und verstanden. Auf Wunsch erhalte ich eine Kopie.

Vorname und Name der Versuchsperson

Anschrift

Ort, Datum und Unterschrift Versuchsperson

Ort, Datum und Unterschrift Versuchsleitung

A.3 Bescheinigung der Ethikkommission zur Selbstauskunft im standardisierten Fragebogen

ethikkommission@eecs.tu-berlin.de
Ethik-Kommission (EK) der Fakultät IV
Technische Universität Berlin
Sek. MAR 5-5
Marchstr. 23, 10587 Berlin



Berlin, 29.09.2021

Application ID: 177
Submitted at: 29.09.2021
Business reference: -

Scientist in charge:

Prof. Dr. Marianne Maertens

Title/description of the research project/study:

"Vergleich der Helligkeitswahrnehmung anhand ausgewählter Versuchsreize:
Modellbasierte Vorhersagen und psychophysische Messungen"

Statement of Ethics Committee for self disclosure in standardized questionnaire

The aims and procedures of this study – as reported by the scientist(s) in charge in a
standardized questionnaire – do not require a statement of the ethics committee.

Research participants

- are not expected to take emotional or physical risks,
- are not exposed to a high level of (physical or emotional) stress,
- are fully informed about the purpose and procedures of the study,
- do not belong to a vulnerable group (e.g. children, patients, persons with limited capability to judge)
- do not undergo fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging) or TMS (Transcranial Magnetic Stimulation) during the course of the study

The scientist(s) in charge have agreed to protect data privacy, to fully inform participants about the purpose and procedures of the study, and to obtain informed consent prior to the study. This statement presupposes the truthful reply to all questions in the questionnaire and the responsible consideration of all ethical aspects of experimental study design with human participants.

Kind regards,

Ethics Commission Faculty IV
TU Berlin